



**projekträger
jülich**

Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2025

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 Rahmen der Maritimen Forschungsstrategie 2025 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert. Der Tagungsband wurde aus Projektfördermitteln des BMWE finanziert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgeber und Vertrieb
Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek, Verlag
D-52425 Jülich

Telefon 02461 61 - 53 68
Telefax 02461 61 - 61 03
E-Mail zb-publikation@fz-juelich.de
Internet www.fz-juelich.de/zb

Satz und Layout
Projektträger Jülich

Schriftenreihe Projektträger Jülich
ISBN 978-3-95806-873-5

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

Dies ist eine Open-Access-Publikation, die unter den Lizenzbedingungen der Creative Commons Attribution License 4.0 veröffentlicht wurde, welche die uneingeschränkte Nutzung, Verbreitung und Vervielfältigung in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird.

Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2025

Schriftenreihe Projektträger Jülich

Vorwort

Die maritime Branche ist ein Eckpfeiler für die positive wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland. Maritime Technologien und Unternehmen spielen eine zentrale Rolle, wenn es darum geht, aktuelle und künftige Herausforderungen zu bewältigen – zum Beispiel mit Blick auf die Versorgungssicherheit unseres Landes, auf die Resilienz unserer Infrastrukturen und unserer Energieversorgung. Deutschland verfügt über exzellentes maritimes Know-how. Es verschafft uns internationale Wettbewerbsvorteile und bringt innovative Technologien und Geschäftsmodelle für Schiffbau, Schifffahrt, Häfen sowie Offshore-Windkraft und Meerestechnik hervor. Diese Innovationskraft stärkt die Bundesregierung verlässlich und kontinuierlich mit dem Maritimen Forschungsprogramm. Ein paar Beispiele:

Der maritime Raum ist ein Ort globaler Vernetzung – über und unter dem Wasser. Maritime Infrastrukturen sind Lebensadern für Daten, Energie und Logistik und als solche werden sie in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Angesichts zunehmender geopolitischer Konflikte müssen diese kritischen Infrastrukturen wirksam geschützt werden. Lösungen hierfür kommen aus dem Maritimen Forschungsprogramm.

Klimafreundliche Innovationen sind entscheidend für die Zukunftsfähigkeit der maritimen Wirtschaft. Deshalb unterstützt die Bundes-

regierung die Entwicklung klimaneutraler Antriebe. Sie ebnen den Weg hin zu einer nachhaltigen Schifffahrt und stärken zugleich die Position deutscher Unternehmen auf dem Weltmarkt.

Außerdem entstehen aus dem Maritimen Forschungsprogramm heraus praxisnahe Konzepte für die systematische Bergung von Munition im Meer, die Schifffahrt, Offshore-Nutzung und unsere Nahrungskette gleichermaßen gefährdet.

Der vorliegende Tagungsband zur Statustagung „Maritime Technologien“ zeigt eine maritime Zukunft mit nachhaltigen Innovationen und digitaler Transformation und stellt dar, welche Beiträge das Maritime Forschungsprogramm auf diesem Weg leistet.

Ich lade Sie ein, die Statustagung als Plattform für den fachübergreifenden Austausch zu nutzen, gemeinsam Lösungsansätze zu entwickeln und Impulse zu setzen. Ich wünsche Ihnen eine aufschlussreiche Lektüre und freue mich auf den persönlichen Austausch mit Ihnen.

Dr. Christoph Ploß

Koordinator der Bundesregierung für
die Maritime Wirtschaft und Tourismus

Inhalt

TEME2030+	10
Technologieevaluation für Marinemotoren zur Erreichung der THG-Ziele 2030 und folgend	
CIAM	42
Cooperative Development of a Comprehensive Integrated Autonomous Underwater Monitoring Solution	
UnLowDet	64
Laserinduzierte Unterwasser Low-Order-Detonation zur effizienten Entschärfung von Kampfmitteln im Meer	
AMMOTRACe	76
Chemische Echtzeitdetektion von Altmunition im Meer: Ergebnisse, Systemik und Reifegrad des AMMOTRACe-Konsortiums	
OCUMAR	96
Automatisierter und teilautonomer Schiffsbetrieb in beengten Seegebieten mit nicht-kooperativen Teilnehmern	
SMATRA	116
Verbesserte Bewertung der Schwingfestigkeit geschweißter maritimer Tragstrukturen unter Anwendung lokaler Nachweiskonzepte	
Red-Emi	132
Reduktion der hydroakustischen Emission von Propulsionssystemen	

SimPleShip	154
Simulationsplattform zur digitalen Gesamtsystemanalyse und energetischen Betriebsoptimierung komplexer Passagierschiffe	
ThermoMarE	174
Fortschrittliche Thermoelemente-Technologie für hybride maritime Heizsysteme unter Einbeziehung elektrischer Batterietechnik	
SKALa	196
Systematische Lösungsansätze zur optimalen Korrosionsschutzwirkung von Anstrichsystemen an besonders beanspruchten maritimen Strukturen Schiff- und Offshore relevanten Bauteilen	
KISSS	222
KI-basierte Fertigungstechnologie für das autonome Laserschweißen komplexer Schiffstrukturen	
HYDROPOLEN	236
Verbrennungs- und Gemischbildungskonzepte zur Erhöhung der Leistungsdichte wasserstoff-betriebener Großmotoren	
BATMAN+	258
Batterieauslegung mittels MC-Simulation des Anlagenverhaltens 4.0	
Bross	282
Ermittlung des Einflusses korrosiver Beanspruchungen und lokaler Fehlstellen auf die Beanspruchbarkeit von Bronze-Gusswerkstoffen	

EROVMUS	298
Enhanced Remote Operated Vehicle Interface for Munition Studies	
MuWIN	316
Multi-use floating offshore topside structure for Wind Energy	
CLINER-ECO	340
Bewertung und Untersuchung von Multi-Fuel-Retrofitlösungen für den klimaneutralen Kraftstoff e-Methanol zum Betrieb in maritimen Großmotoren	
meOHmare	362
CO ₂ -neutrale schnelllaufende Marine-Verbrennungsmotoren auf Basis regenerativ erzeugten Methanol	
FWIGREM	380
Simultane Inversion von seismischen Wellenformen, Elektromagnetik und Gravimetrie	
IRAV	402
Industrielle Räumung von Altlasten in Verklappungsgebieten	

03SX537

TEME2030+

Technologieevaluation für Marinemotoren zur Erreichung der THG-Ziele 2030 und folgend

Autorenliste

Universität Rostock, LKV

Dipl.-Ing. Manuel Glauner
M. Sc. Pascal Seipel
M. Sc. Jules Dinwoodie
Prof. Dr. Bert Buchholz

FVTR GmbH, Rostock

M. Sc. Gunther Näther
Dr.-Ing. Martin Theile

Schaller-Automation

Industrielle Automationstechnik GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Jörg Wahl
Dr. Torsten Bley



1. Projektvorstellung

Das Projekt TEME2030+ hat während der Projektlaufzeit vom 01.04.2021 – 31.07.2025 das Ziel verfolgt, mithilfe geeigneter Technologien die Treibhausgasemissionen maritimer Gasmotoren bis 2030 um bis zu 35 % gegenüber dem Stand der Technik zu Beginn des Projektes zu senken und damit einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Schifffahrt zu leisten. Dabei sind sowohl Optimierungen bestehender LNG-Dual-Fuel Brennverfahren, die Einbindung zukünftiger, synthetischer Kraftstoffe, sowie die Entwicklung neuer Brennverfahren mit Gasdirekteinblasung im Fokus.

Das Projekt wurde von einem breiten, interdisziplinären Konsortium aus dem Bereich der Soft- und Hardware im maritimen Kontext bearbeitet. Projektkoordinator war die FVTR GmbH aus Rostock, die sich auf die experimentelle Analyse und Simulation eines Methanschlupf-Modells konzentrierte und bereits erfolgreich diverse Forschungsprojekte bearbeitet und koordiniert hat. Der experimentelle und simulative Fokus war am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren, wo sich der 1/34 DF Forschungsmotor befindet und die experimentelle Brennverfahrensuntersuchung mit simulativen 3D-CFD Analysen unterstützt wurde. Schaller Automation GmbH & Co. KG ist ein renommierter Hersteller für die Ölnebeldetektion im Kurbelgehäuse von Großmotoren und ist damit ein wichtiger Bestandteil für die Sicherheit von Mensch und Maschine. Fokus im Projekt TEME2030+ war die Entwicklung eines wasserstoff-sensitiven Messsystems zur Analyse der Kurbelgehäuseatmosphäre bei unterschiedlichen Brenngasmischungen aus Erdgas und Wasserstoff. Die assoziierten Partner Kolbenschmidt KS Large Bore Engines, M. JÜRGENSEN GmbH & Co. KG und Kompressorenbau Bannewitz waren involviert in Untersuchungen der Bauteilbelastung von Kolbenoberteil und Laufbuchse sowie in die Untersuchung der Betriebspunktveränderung eines Turboladers bei Verwendung der unterschiedlichen Technologiekonzepte. Umicore AG & Co. KG lieferte als Spezialist für Abgasnachbehandlungssysteme die Oxidationskatalysatoren, mit denen der Methan-Schlupfnachmotorisch reduziert werden sollte.

Das Projekt stützte sich auf drei Hauptsäulen. Die erste umfasste die Untersuchung von Maßnahmen zur Verbesserung des etablierten Niederdruckbrennverfahrens (ND), wie zum Beispiel Abgasrückführung (AGR), Wasserstoffzumischung und Abgasnachbehandlung mittels Methan-Oxidationskatalysator (MOC). In der zweiten Säule wurde sich auf die Entwicklung neuartiger Mitteldruckbrennverfahren (MD) mit Gasdirekteinblasung während des Ansaug- oder zu Beginn des Kompressionstakts fokussiert. Als dritte Hauptsäule wurde ein Hochdruck-Brennverfahren (HD) untersucht, bei dem das Brenngas mit hohen Drücken kurz vor dem oberen Totpunkt eingebracht wird. In diesem Paper werden schwerpunktmäßig Ergebnisse der ersten beiden Hauptsäulen, also unterschiedliche Technologiekonzepte für Nieder- oder Mitteldruck-Brennverfahren vorgestellt.

2. Technologiepakete für das Niederdruck Brennverfahren

Zunächst werden ausgewählte Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum weit verbreiteten Niederdruckbrennverfahrens als Stand der Technik gezeigt. Vorgestellt wird die Abgasrückführung zur innermotorischen Reduktion der Stickoxidemissionen und der dadurch möglichen Betriebspunktverschiebung in Richtung niedriger CH₄ Emissionen (Verschiebung des NO_x-CH₄-Tradeoffs). Anschließend werden die Untersuchungen des Potenzials zur Treibhausgasreduktion (THG) durch Substitution von kohlenstoffhaltigem Brenngas durch den kohlenstofffreien Wasserstoff untersucht. Dabei stehen einerseits die Auswirkungen auf die Verbrennung und die Emissionen im Fokus, andererseits werden die Auswirkungen auf die Kurbelgehäuseatmosphäre seitens Projektpartner Schaller Automation analysiert. Abschließend wird die nachmotorische CH₄ Umwandlung via Methan-Oxidationskatalysator untersucht.

2.1 Hochdruck-Abgasrückführung

Im Rahmen des Projektes TEME2030+ wurde ein Hochdruck-Abgasrückführungssystem (HD-AGR) aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Abgasrückführung ist ein Verfahren zur Emissionsminderung

in Verbrennungsmotoren, bei der eine definierte Menge Abgas der Ladeluft wieder hinzugefügt wird. Die rückgeführte Abgasmenge wirkt dabei wie ein inertes Medium, es senkt den Sauerstoffpartialdruck und reduziert dadurch die Flammgeschwindigkeit, die Maximaltemperaturen und die maximalen Zylinderdrücke. Zusätzlich zu diesem Inertgas-Effekt wird die thermische Drosselung durch Änderungen der thermophysikalischen Eigenschaften des Ansauggemisches erreicht: Die Anwesenheit von triatomaren Verbrennungsprodukten wie Kohlenstoffdioxid und Wasser anstelle von Sauerstoff oder Stickstoff erhöht die Wärmekapazität des Gemisches.

Der Aufbau des AGR-Systems am 1/34 DF Forschungsmotor ist stark vereinfacht in Abb. 1 dargestellt. Die bestehende Abgasleitung wurde um einen Anschluss erweitert, an dem Abgas entnommen werden kann. Nach einem elektrisch angesteuertem Regelventil wird dabei das Abgas mithilfe eines Wärmeübertragers abgekühlt, bevor es in der Verdichtereinheit komprimiert wird, um das positive Spülgefälle zu überwinden. Das komprimierte und dadurch erwärmte Gas wird anschließend durch den zweiten Wärmeübertrager geleitet und auf ein der Ladeluft ähnliches Temperaturniveau abgekühlt. Das Regelventil vor der Rückführung dient zur Feinjustierung der AGR-Rate.

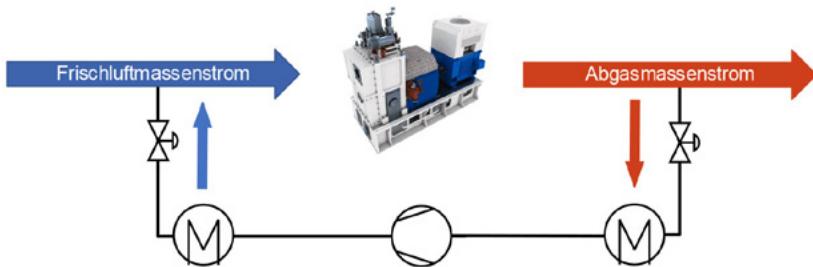


Abb. 1: Schema der AGR-Strecke

Es wurden diverse Versuche durchgeführt und veröffentlicht, z. B. in [1]. Folgend sind Variationen der AGR-Rate bei unterschiedlichen Lastpunkten mit einem konstanten Verbrennungsschwerpunkt von 8° KWNOT dargestellt.

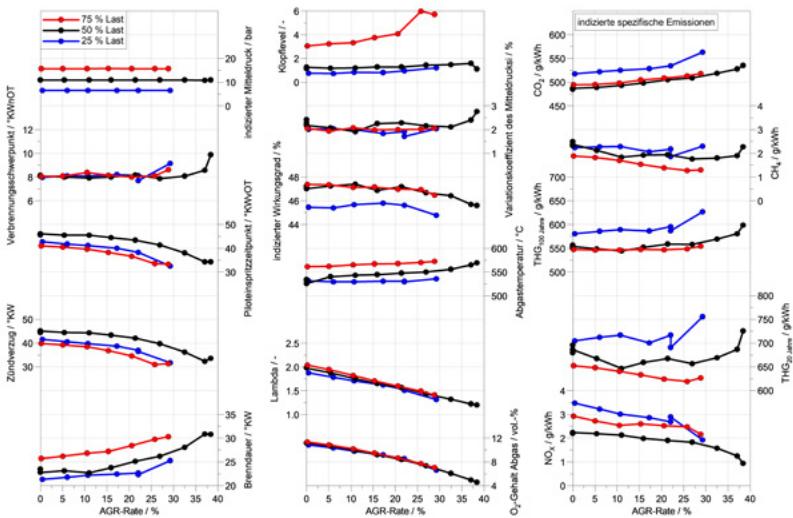


Abb. 2: Auswirkung der AGR-Rate auf den O_2 -Anteil im Abgas sowie die indizierten CH_4 und NO_x -Emissionen bei konstanten Motorbetriebsparametern

In Abb. 2 sind die Ergebnisse von drei Variationen der AGR-Rate bei unterschiedlichen Lastpunkten und ansonsten konstanten Betriebsparametern dargestellt. Die erwähnte Verringerung des Sauerstoffpartialdruckes ist durch die Absenkung von O_2 im Abgas erkennbar. Diese Reduktion geht auch mit einer Verringerung des Lambda-Wertes von nahe 2 bis etwa 1,2 einher. Eine Reduktion von CH_4 im Abgas ist bei AGR-Raten bis etwa 32 % erkennbar, bevor durch die Verbrennungsinstabilität und die späte Schwerpunktlage der Methanschlupf wieder ansteigt. Diese Verringerung der spezifischen CH_4 -Emissionen bringt aufgrund des hohen Treibhauspotenzials trotz des leicht sinkenden Wirkungsgrades und damit leicht steigenden CO_2 Emissionen auch Vorteile in der Treibhausgas-Bilanz mit sich. Zusätzlich können mit dem Einsatz eines AGR-Systems die Stickoxid-Emissionen mit steigender Rate weiter gesenkt werden. Damit stellt die aufgebaute HD-AGR ein System dar, mit dem neben den gesundheitsschädigenden Stickoxiden auch der klimabelastende CH_4 -Schlupf verringert werden kann. Eine weitere Reduzierung der THG-Emissionen kann durch eine gezielte Betriebspunkt-

verschiebung erreicht werden. In Betriebspunkten, die entsprechend des typischen NO_x - CH_4 -Trade-Offs beispielsweise zum Einhalten eines NO_x -Grenzwerts relativ hohe CH_4 Emissionen aufweisen, kann durch die Reduktion der Stickoxidemissionen der Betriebspunkt (Schwerpunktlage, Lambda, ...) angepasst werden, um die CH_4 Emissionen zu senken. Des Weiteren bietet die AGR-Strecke hervorragende Möglichkeiten, um bei neuartigen Brennverfahren mit innerer Gemischbildung (z. B. Schichtladung oder Diffusionsverbrennung) die dabei zu erwartenden hohen Stickoxidemissionen zu senken.

2.2. Wasserstoff-Zumischung

Bereits im Rahmen eines vorangegangenen Förderprojekts (LEDF 2) wurde eine Gasmischchanlage für den Einzylinder-Forschungsmotor des LKV aufgebaut. Im abgeschlossenen Projekt TEME 2030+ wurde diese um einen Wasserstoff-Zumischpfad erweitert. Damit ist es möglich, dem Erdgas bis zu 30 vol.-% (bei Teillast auch mehr) Wasserstoff zuzumischen. Bei Wasserstoffzumischung sind verschiedene Einheiten geläufig, die in inhaltlichem Zusammenhang mit dem Kontext der jeweiligen Anwendung stehen. Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang der masse-, energie- sowie volumenbezogenen Wasserstoffanteile im Erdgas.

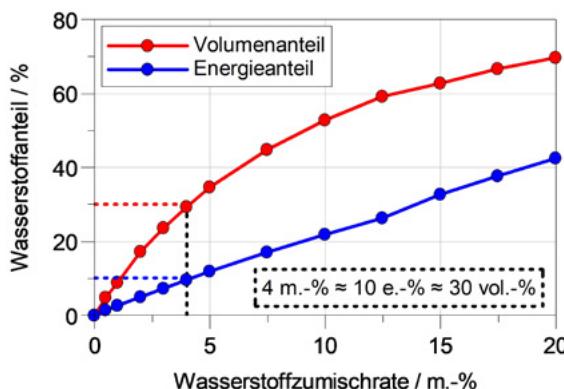


Abb. 3: Zusammenhang von volumetrischem, energiebezogenen und massebezogenen Wasserstoffanteilen bei Zumischung zu Erdgas aus dem öffentlichen Erdgasnetz

Im Rahmen der Messkampagnen wurde eine umfangreiche Versuchsmatrix mit unterschiedlichen Zumischraten bei unterschiedlichen Lastpunkten durchgeführt. Des Weiteren wurden diverse Motorbetriebsparameter wie Schwerpunktlage und Luftverhältnis weiteren Detailuntersuchungen unterzogen, welche bereits in [2] veröffentlicht wurden. Als Ergebnis dieser Untersuchungen konnte der Einzylindermotor ohne Anpassungen der Hardware in einem weiten Kennfeld sicher und effizient betrieben werden. Voraussetzung dafür war lediglich die Verwendung eines geschlossenen Regelkreises auf Basis der Echtzeit-Zylinderdruckauswertung, um die geänderten Verbrennungseigenschaften des Gasgemischs (steigende Flammgeschwindigkeit bei H₂-Zumischung) durch einen angepassten Piloteinspritzzeitpunkt auszugleichen. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse bei einer Erhöhung der H₂-Zumischarte bei verschiedenen Lastpunkten mit aktivierter Schwerpunktlagenregelung via Anpassung des Piloteinspritzzeitpunkts.

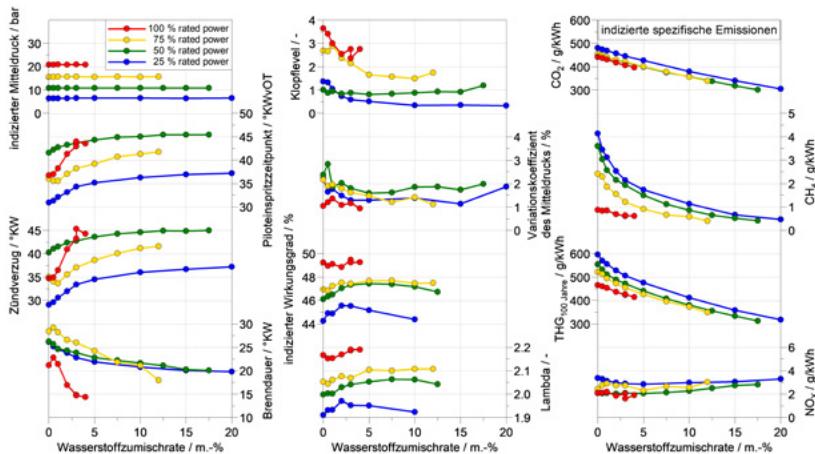


Abb. 4: Untersuchung des Einflusses der Wasserstoffzumischarte auf die wichtigsten Kenngrößen hinsichtlich Verbrennungscharakteristik und Emissionen bei verschiedenen Lastpunkten

Bereits bei geringen H₂-Zumischarten ist ein großer Einfluss auf die Verbrennung festgestellt worden. Grundsätzlich wirkt sich der Wasserstoff durch zwei unterschiedliche Mechanismen aus: Zum einen wird durch die Substitution von kohlenstoffhaltigem

Erdgas durch kohlenstofffreien Wasserstoff der Ausstoß von CO₂-Emissionen analog zum energiebezogenen Wasserstoffanteil reduziert. Zum anderen beeinflusst der Wasserstoff auch die Verbrennung des übrigen Erdgases zum Positiven. Zumischraten bis zu 5 m.-% (ca. 35 vol.-%) wirken sich positiv auf die Verbrennungsstabilität, den Wirkungsgrad und insbesondere die CH₄-Emissionen aus, was aufgrund des hohen Treibhauspotenzials von Methan zu einer signifikanten Reduzierung der Gesamt-Treibhausgasemissionen führt. Wasserstoffzumischung bietet also das Potenzial, besonders in Teillastbetriebspunkten eine überproportionale Reduzierung der THG-Emissionen zu erzielen, wie in Tab. 1 dargestellt ist.

Tab. 1: Reduzierungspotenzial der Treibhauseffekt-relevanten Emissionen bei unterschiedlichen Lastpunkten mit 5 m.-% Wasserstoffzumischung (bei Volllast 4 m.-% Zumischarte)

Last	%	25	50	75	100
H ₂ -Zumischung	e.-%	11	11	11	10
CO ₂	%	-11	-12	-12	-10
CH ₄	%	-58	-58	-62	-30
THG _{100 Jahre}	%	-20	-20	-18	-11

Mit den Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass bereits geringe Anteile Wasserstoff eine überproportional große Verbesserung der Treibhausgasemissionen bewirken. Des Weiteren konnte das Potenzial zur THG-Reduzierung für die Anwendung in einem mittelschnelllaufenden Dual-Fuel Motors genau quantifiziert werden, wodurch eine Datenbasis für die Auslegung / Berechnung vergleichbarer Anwendungen geschaffen werden konnte.

2.2.1 Entwicklung und Validierung eines modularen Wasserstoff-Mess- und Überwachungskonzepts für das Kurbelgehäuse maritimer und stationärer Großmotoren

Neben der Untersuchung des Einflusses der Wasserstoffzumischarte auf die wichtigsten Kenngrößen hinsichtlich der Verbrennungs-

charakteristik und Emissionen bei verschiedenen Lastpunkten, war die stetige Überwachung der Gaszusammensetzung (Blow-by) im Kurbelgehäuse, im speziellen der Wasserstoff- und Methankonzentration innerhalb der unteren Explosionsschutzwelle (LEL), ein weiterer wichtiger Aspekt im Projekt TEMA 2030+. Hierbei diente die Detektion der Methan- und Wasserstoffkonzentration als vollumfängliche Zustandsüberwachung des Kurbelgehäuses hinsichtlich Verschleiß des Kolbenring-Pakets, Schäden an der Laufbuchse oder auch initiales Durchblasen nach lokaler Überhitzung im Kolbenboden, welche letztlich immer zu einem erhöhtem Blow-by- und damit zu einer erhöhten (unverbrannten) Gaskonzentration im Kurbelgehäuse führten. Die Entwicklung und Bereitstellung des Wasserstoff- und Methan- selektiven Gassensors „GasMOS-H₂“, erfolgte durch den direkten Kooperationspartner Schaller Automation in enger Zusammenarbeit mit dem LKV.

Schaller Automation entwickelt, produziert und vertreibt seit über 55 Jahren Sicherheitssysteme für große Diesel-, Gas- und Dual-Fuel-Motoren, sogenannte Ölneblerkennungssysteme, die erfolgreich in Schiffen und Kraftwerken eingesetzt werden. Seit 2018 entwickelt das Unternehmen auch im Rahmen der Zustandsüberwachung von Großmotoren erfolgreich hochempfindliche und intelligente Gas-Überwachungssysteme, zur selektiven Messung von Wasserstoff- und Methankonzentrationen im Kurbelgehäuse.

Die Entwicklung des „GasMOS-H₂“ Konzeptes stützte sich im Wesentlichen auf die Weiterentwicklung der GasMOS- Sensorplattform, basierend auf dem bereits entwickelten GasMOS Methan-Konzepts, um eine zeitgleiche Detektion von Methan- und Wasserstoffkonzentrationen zu ermöglichen. Dabei wurde neben der Entwicklung eines speziellen Wasserstoff- selektiven Multisensors (Array) auch die Messgasfiltration, die programmtechnische Umsetzung eines Auswertealgorithmus, die ATEX- /IECEx Zertifizierung des Systems, sowie die Einbindung in eine Predictive Maintenance Umgebung mit Online- Zustandsüberwachung des Kolbenring-paketes durchgeführt. Als Ergebnis ging ein technisches Konzept, sowie ein final funktionierendes getestetes Prototypensystem

nach TLR6 hervor, auf Basis dessen die Serienentwicklung und Markteinführung nun forciert werden kann. Die Eignung des Prototyps erfolgte innerhalb mehrerer Messkampagnen sukzessive am Forschungsmotor 1/34DF des LKV in Rostock gemäß nachfolgender Abbildung.



Abb. 5: Versuchsaufbau (Setup) mit GasMOS- H₂ Prototyp (rechts) beim LKV- Rostock

Gemäß Prüfplan wurden die einzelnen Versuchsreihen innerhalb der verschiedenen Motor- Eindüsungsverfahren (Niederdruck, Mitteldruck, Hochdruck) bei jeweiligen Motorlasten von 50% / 75 % / 100 % durchgeführt, bzw. die Wasserstoffbeimischung im Brenngas (LNG) mit jeweils 0 Vol.% / 5 Vol.% / 15 Vol.% / 30 Vol.% variiert. Als weitere Referenzquellen, wurden Proben der Blow-by- Atmosphäre zu den jeweiligen Betriebspunkten gezogen und in einem akkreditierten Labor analysiert. Zusätzlich wurde ein Online- Gaschromatographen verwendet.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine aktuelle Online- Auswertung von GasMOS-H₂ aus der Messkampagne vom 01.07.2025, in welchem zeitgleich Methan (CH₄, blauer Graph) und Wasserstoff (H₂, roter Graph) innerhalb einer Messkampagne detektiert und offsetkorrigiert aufgezeichnet wurden. Als Referenzquelle wurde zusätzlich ein Online- Gaschromatograph (Methan: blaue Punkte; Wasserstoff: rote Punkte) verwendet. Das Gesamtergebnis zeigt

deutlich, dass im Vergleich mit der gemessenen Konzentration von CH₄ des GC und GasMOS-H₂ eine sehr hohe Übereinstimmung vorliegt. Die Abweichung des GasMOS-CH₄- Messwertes zum CH₄- Messwert des Gaschromatographen, beträgt kleiner 0,01vol.% CH₄. Im Vergleich zur H₂- Konzentration konnte eine maximale Abweichung des Messwertes zwischen GasMOS-H₂ und Gaschromatographen von kleiner 0,05 vol.% H₂ festgestellt werden.

Insgesamt zeigen die gemessenen Konzentrationswerte von H₂ und CH₄ eine bereits sehr hohe Übereinstimmung mit den jeweiligen Referenzsystemen, sodass die grundsätzliche Motivation von TEME2030+ dadurch (erneut) bestätigt- und eines der Hauptziele erfolgreich erreicht wurde.

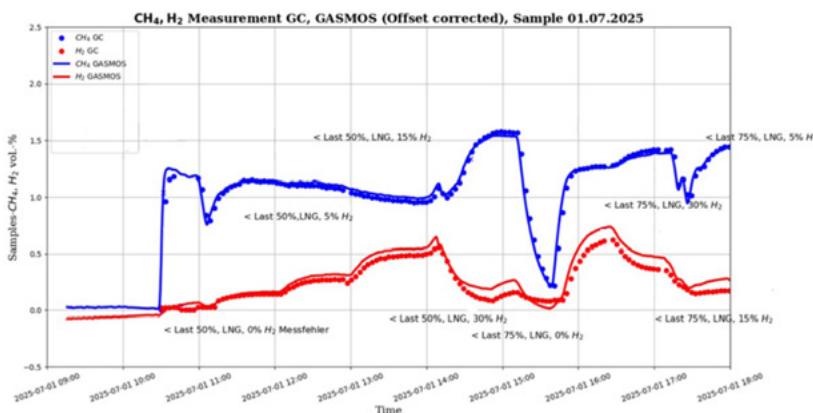


Abb. 6: Ergebnisse des GasMOS-H₂ Prototyps im Vergleich zu einem Gaschromatographen als Referenz bei der Messkampagne beim LKV am 01.07.2025

2.3 Abgasnachbehandlung: Methan-Oxidationskatalysator

Oxidationskatalysatoren werden im Allgemeinen in Abgasnachbehandlungssystemen eingesetzt. Dabei strömt das Abgas durch einen Katalysatorträger, der oftmals aus Keramik hergestellt und entweder edelmetallhaltig oder edelmetallfrei ist. Edelmetallfreie Katalysatoren haben den Vorteil, dass Sie günstiger und widerstandsfähiger gegenüber Fremdstoffen wie Schwefeldioxid sind. Problematisch ist allerdings, dass diese Katalysatoren eine hohe Light-Off Temperatur

besitzen und demnach bei den gegebenen Abgastemperaturen eine geringere Konvertierungsrate aufweisen. Oxidationskatalysatoren werden genutzt, um neben dem Kohlenmonoxid und Stickstoffmonoxid auch Kohlenwasserstoffe, in diesem Falle hauptsächlich Methan, zu oxidieren. Somit können MOCs eine Lösung sein, um den klimaschädlichen Methanschlupf zu verringern.

Im Rahmen des Projektes TEME2030+ wurde ein edelmetallhaltiger Methan-Oxidationskatalysator (MOC) untersucht, bei dem auf dem Cordierit-Keramik Trägermaterial eine Pd / Al₂O₃ Beschichtung mit einem relativ hohen Pd Anteil. Für Voruntersuchungen wurde ein Synthesegas-Prüfstand genutzt. Auf Basis der dort gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend Motorversuche durchgeführt und die Ergebnisse veröffentlicht [3]. Der Umbau am Forschungsmotor ist exemplarisch in Abb. 7 dargestellt.

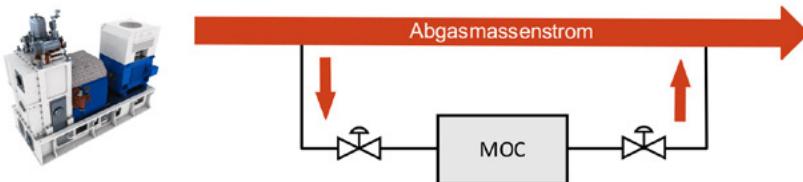


Abb. 7: Bypass-Kanal für MOC-Untersuchungen am 1/34 DF Forschungsmotor

Der bestehende Abgastrakt wurde um einen Bypass-Kanal erweitert, in dem in Summe zwei Katalysator-Bricks in den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 150 mm (BxHxT) verbaut werden können. Der Bypass-Durchfluss wird mit elektrisch angesteuerten Ventilen geregelt. Die Bypass-Strecke ist vollständig mit Messtechnik erfasst, sodass die exothermen Reaktionen auch mit hierfür vorgesehenen Temperaturmessstellen erfasst werden können. Das Emissionsminderungspotential bei verändertem Bypass-Massenstrom und damit einhergehender Raumgeschwindigkeit ist in Abb. 8 dargestellt.

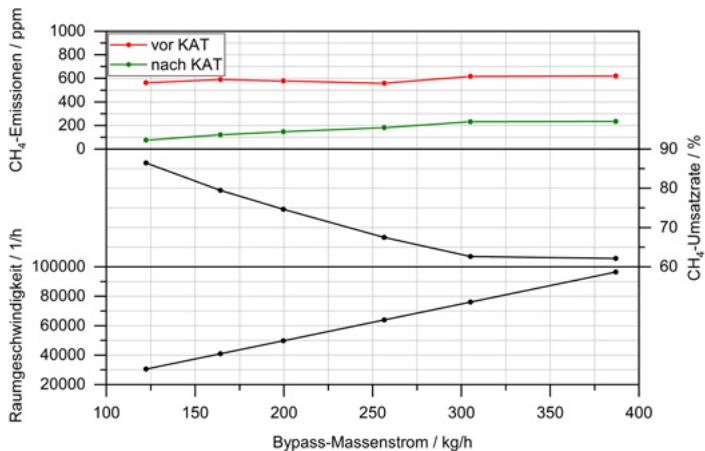


Abb. 8: CH₄-Reduktionspotential eines MOC bei unterschiedlichem Durchfluss

Anhand der Messungen ist das Potential des MOC deutlich zu erkennen. Bei niedrigem Bypass-Massenstrom von etwa 120 kg/h und einer damit einhergehenden Raumgeschwindigkeit von 30.000 h⁻¹ können Umsetzungsrationen von > 85 % erreicht werden. Allerdings wurde auch eine zügige Deaktivierung des MOC beobachtet (siehe [3]), sodass dies Fokus weiterer Untersuchungen sein muss, um auch langfristig das Methan-Reduktionspotential abrufen zu können.

3. Mitteldruck-Gasdirekteinblasung

Durch 3D-CFD Simulationen und Versuche am Forschungsmotor konnte die neuartige Mitteldruck-Gasdirekteinblasung untersucht werden. Diese erfolgt im Ansaug- oder Kompressionstakt bei moderaten Einblasedräcken (bis 80 bar). Hierfür wurden spezielle Injektoren geliefert und am Versuchsträger installiert. Zudem wurde die Infrastruktur des Forschungsmotors um einen Hochdruckgasverdichter erweitert. Mit den MD-Untersuchungen sollte bewertet werden, ob moderat erhöhte Einspritzdrücke zu deutlichen Vorteilen bei den THG Emissionen eines DF-Motors bei gleichzeitig moderaten technischen Aufwänden führen.

3.1 CFD Simulation

Die Simulation des motorischen Innenprozesses mittels 3D-CFD erwies sich als innovative Säule des Projektes. Mittels transienter RANS Simulationen des gesamten Brennraums samt Einlass und Auslasskanälen konnte der Versuchsumfang deutlich reduziert werden, da optimale Eindüsestrategien mit diesem Werkzeug erarbeitet werden konnten und das Verhalten der neuen direkteindüsenden Injektoren schon vor Einbau untersucht werden konnte, siehe Abb 9. Für weitere Simulationsergebnisse, siehe [7 – 12].

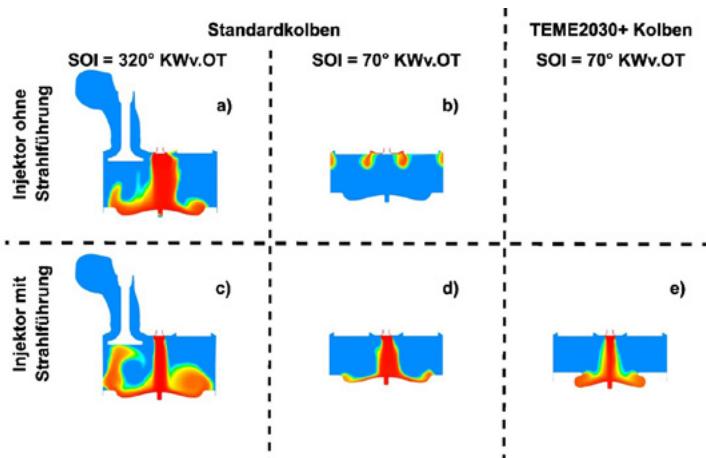


Abb. 9: Gaseinblasung visualisiert durch Lambda für verschiedene Injektordüsenkonfigurationen, Eindüsezeitpunkte und Kolbenformen

Für das homogene Brennverfahren ähnlich dem ND-PFI (Niederdruck-Saugrohreindüsung, Port Fuel Injection) des Serienmotors eignet sich eine saugsynchrone Eindüsung (siehe Abb. 9 a) und c)), wie auch in Abb. 10 zu sehen ist.

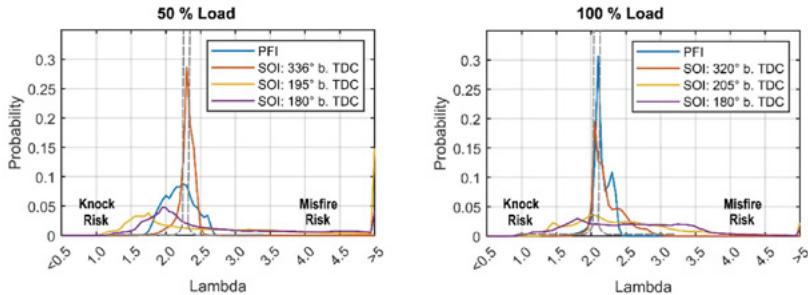


Abb. 10: Lambdaverteilung bei 10 °KWvOT für den Injektor ohne Strahlführung und dem Standard-Kolben

Das Diagramm zeigt die Lambdaverteilung im Brennraum an. Eine vollständige Homogenisierung würde bedeuten, dass alle Bereiche im Zylinder annähernd das gleiche Lambda besitzen würden, wie durch die graue gestrichelte Linie dargestellt. Diese vollständige Homogenisierung wird in der Realität nie erreicht.

Bei einer Direkteindüsung und einem SOI (Start of Injection, Eindüsebeginn) von 336° KWvOT bei 50 % Last wird die beste Homogenisierung erreicht. Dieses Gemisch ist sogar homogener als bei der herkömmlichen PFI Dosierung. Bei 100 % Last ist die Homogenisierung bei PFI besser ausgeprägt, jedoch findet auch eine gute Homogenisierung durch die Direkteinblasung statt. Durch die Simulation und den Vergleich der Homogenisierung im Zylinder konnten Eindüsestrategien entwickelt werden, die später im Projektverlauf auch am Motor gefahren wurden. Die Simulationsergebnisse wurden auch durch die Motorenversuche bestätigt. Durch die saugsynchrone Einblasung konnten niedrige Methanschlupfwerte erreicht werden.

Für das Mitteldruckverfahren wurde mithilfe der CFD einen Kolbenoberteil entworfen und von KS Large Bore Pistons gefertigt, welches eine Schichtladung ermöglicht, siehe Abb. 9, e) und Abb. 11.

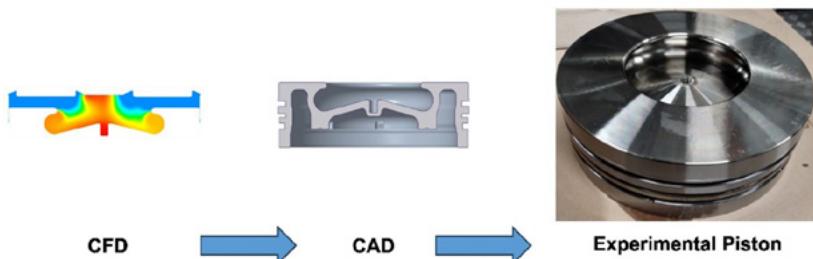


Abb. 11: Entwurf eines experimentellen Schichtladungskolben mithilfe der CFD

Mit diesem Kolbenoberteil und dem Gasdirektinjektor mit Strahlführung ist es möglich, das Gas im Zentrum des Brennraums zu halten um Quenchingeffekte (Flammenlöschung) an der Wand zu minimieren. Dieses Verfahren hat einen niedrigen Methanschlupf zu Folge, da kein Methan durch Überspülverluste verloren geht und unverbranntes Methan infolge der Quenchingeffekte reduziert wird, was auch in den experimentellen Ergebnissen wiedergegeben wird. Weitere Ergebnisse zu diesem Verfahren wurden bereits in [10, 12] veröffentlicht.

3.2 Experimentelle Untersuchungen

Nach Voruntersuchungen mithilfe von 3D-CFD-Simulationen und Komponentenprüfständen (Untersuchung der DI-Injektoren) standen die experimentellen Untersuchungen mit Gas-Direkteinblasung am Einzylinder-Forschungsmotor zur Reduktion von CO_2 und CH_4 Emissionen im Fokus. Wie bereits zuvor erläutert, soll durch die innere Gemischbildung der Methanschlupf aus den beiden unterschiedlichen Entstehungsmechanismen (Überströmen während Ventilüberschneidung, Flammlösung in Spaltbereichen und nahe der kalten Brennraumwände) reduziert werden.

Dafür wurden simulationsgestützt zwei Strategien definiert und experimentell untersucht: Der Homogenbetrieb mit früher, saugsynchrone Gaseinblasung sowie das Schichtladungsbrennverfahren

mit einer Gaseinblasung zu Beginn der Verdichtung. Das Brennverfahren mit früher, saugsynchrone Gaseinblasung resultiert in einer nahezu **homogenen Gasverteilung** (MD-H) im Brennraum und zeichnete sich durch eine sehr gute Übertragbarkeit der Erfahrungen aus dem Niederdruck-Brennverfahren mit äußerer Gemischbildung aus. Neben dem Einbau des Gasinjektors selbst waren hardwareseitig keine weiteren Anpassungen erforderlich. Auch softwareseitig bzw. bei der Definition der Betriebsparameter mussten lediglich die Parameter der Gasdirekteinblasung (Gasdruck, Ansteuerzeitpunkt) neu definiert werden, übrige Parameter wie Ladedruck, Luftverhältnis und die Piloteinspritzstrategie konnten übertragen werden. Mithilfe der Voruntersuchungen auf Basis von 3D-CFD Simulationen zur Gemischbildung sowie experimenteller Untersuchung der Injektoren an den Komponentenprüfständen konnte das Brennverfahren erfolgreich appliziert und optimiert werden, sodass mit Mitteldruck-Direkteinblasung vergleichbare Werte hinsichtlich Wirkungsgrad und Verbrennungsstabilität erreicht wurden, was unter Berücksichtigung des Prototypencharakters der Injektoren und des im Vergleich zum ND-Brennverfahren (Stand der Technik) kurzen Untersuchungszeitrahmens als Erfolg hervorzuheben ist. Mit den Vorteilen der großen Übertragbarkeit vom ND-Brennverfahren (was z. B. auch auf NO_x Emissionen zutrifft) geht jedoch auch ein Nachteil bezüglich der Emissionen einher: Während das Überströmen von Methan während der Ventilüberschneidung durch Direkteinblasung effektiv unterbunden werden kann, kommt es durch die frühzeitige Gaseinblasung und die gute Homogenisierung im Brennraum weiterhin zu CH₄ Emissionen durch Flammlösung in Spaltbereichen und nahe der kalten Brennraumwände. In der folgenden Abbildung sind die unterschiedlichen MD-Brennverfahren sowie das ND-Brennverfahren als Referenz anhand von Druck-, Heizverlauf sowie den Ansteuersignalen der Kraftstoffeinbringung dargestellt.

Um die CH₄ Emissionen weiter zu senken wurden Untersuchungen mit dem **Schichtladungsbrennverfahren** (MD-SL) durchgeführt. Dafür waren gegenüber dem Standard-Setup weitere Hardwareanpassungen nötig: der Gasinjektor wurde mit der Strahlführung ausgestattet und das zuvor auf Basis der 3D-CFD Simulationen

konstruierte Kolbenoberteil mit ausgeprägter Omega-Mulde eingebaut. Mit dieser Einblasstrategie haben die Parameter Druck und Zeitpunkt einen signifikanten Einfluss auf die Verteilung des Brenngases innerhalb des Brennraums bzw. der Kolbenmulde. Bei frühen Einblasezeitpunkten wird genügend Sauerstoff vom Gas-Jet mit eingezogen, allerdings strömt auch ein Teil des Erdgases aus der Kolbenmulde heraus. Bei späten Timings verbleibt das Erdgas sehr gut in der Kolbenmulde, sodass die CH_4 Emissionen sinken. Allerdings kann durch lokalen Sauerstoffmangel der Wirkungsgrad sinken, was zu erhöhten CO_2 Emissionen führt. Detailliertere Ergebnisse wurden bereits in [12] veröffentlicht. Im folgenden Vergleich der unterschiedlichen Brennverfahren wird ein mittlerer Einblasezeitpunkt (80°KWvOT) als Kompromiss in diesem CO_2/CH_4 Trade-Off gewählt. Die weitere Reduzierung der CH_4 Emissionen konnte somit experimentell nachgewiesen werden, während die NO_x Emissionen aufgrund der lokal hohen Temperaturen durch das fette Gemisch jedoch wie zu erwarten stark anstiegen. Ohne weitere innermotorische oder nachmotorische Maßnahmen wäre damit beispielsweise keine IMO Tier III Konformität gewährleistet, was typischerweise ein großer Vorteil der aktuell weit verbreiteten ND-Dual-Fuel Motoren ist.

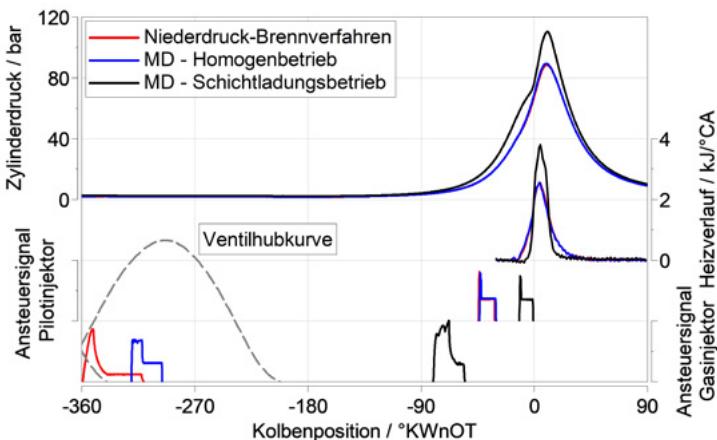


Abb. 12: Vergleich des Zylinderdrucks und Heizverlaufs des Nieder- und Mitteldruck-Brennverfahrens, homogen und Schichtladungsbetrieb

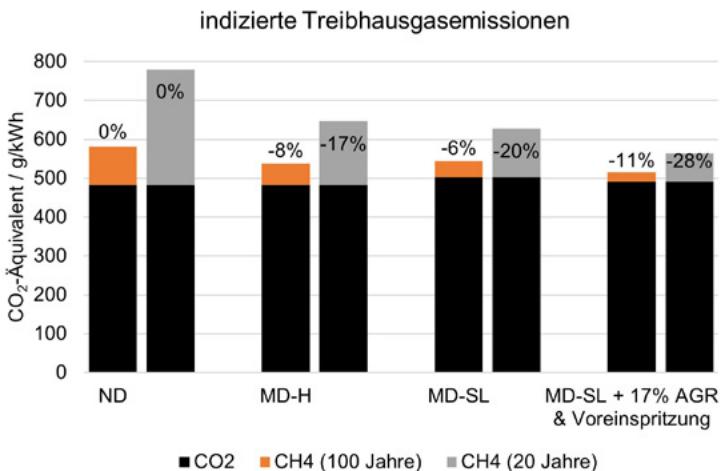
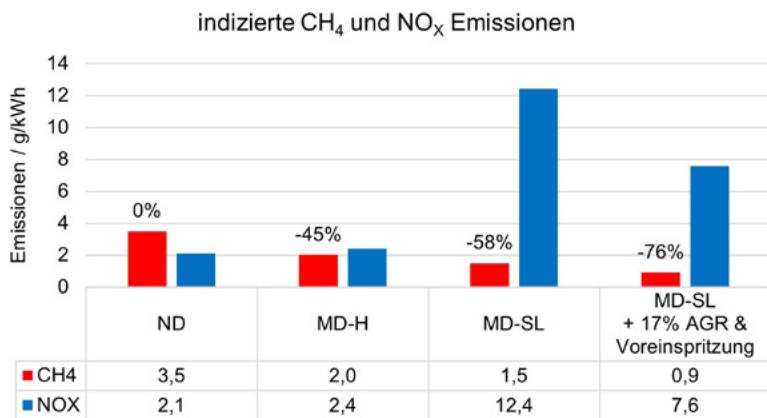


Abb. 13: CH₄ und NO_x sowie Treibhausgas Emissionen der unterschiedlichen Strategien mit Mitteldruck-Direkteinblasung im Vergleich zum Niederdruck-Brennverfahren bei 50 % Motorlast

Aufgrund der Wirkungsgradverluste im Schichtladungsbrennverfahren und den im Gegensatz zum MD-H Brennverfahren dadurch leicht erhöhten CO₂ Emissionen wird ein Teil des CH₄ Vorteils zunichte gemacht. Gegenüber dem Homogenbrennverfahren mit Direkteinblasung sind die THG Emissionen also nur leicht reduziert oder sogar leicht erhöht, je nach Gewichtungsfaktor bzw. betrachtetem Zeitrahmen für die CH₄ Emissionen. Der dafür jedoch erforder-

liche und deutlich erhöhte Umbauaufwand erzielt also ohne weitere Optimierungsmaßnahmen noch nicht den angestrebten Effekt. Um das Potenzial zu maximieren wurde eine optimierte Piloteinspritzstrategie mit Voreinspritzung untersucht. Außerdem konnte die AGR Strecke erfolgreich dazu genutzt werden, die NO_x Emissionen innermotorisch signifikant zu senken. Damit konnten die CH₄-Emissionen in diesen repräsentativen Betriebspunkten um bis zu 76 %, die THG Emissionen mit einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren um 11 % sowie 28 % bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren reduziert werden.

4. Methanschlupfmodell

Seitens FVTR GmbH wurde auf Basis eines 0D / 1D Simulationsmodells des 1/34DF-Forschungsmotors ein Referenzmodell eines Methanschlupfmodells entwickelt, um einerseits die technische Machbarkeit darzustellen und andererseits ein Framework zu erstellen, in welches dann verschiedene Submodelle implementiert werden können, um die verschiedenen Quellen der Methanemissionen abzubilden.

Vergangene Versuche, komplexe Zusammenhänge zwischen motorischen Parametern und dem Methanschlupf mithilfe neuroaler Netze abzubilden, war nur zum Teil erfolgreich. Bei veränderten Wertebereichen der Eingangsparameter des Netzes zeigte sich eine mangelnde Extrapolationsfähigkeit derartiger Modelle.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde im Folgenden versucht Teilphänomene der Entstehung des Methanschlupfes mittels (semi-) physikalisch-basierter Modelle abzubilden. Gemäß [4] verbleibt unverbranntes Methan im Abgas größtenteils aufgrund folgender drei Phänomene.

- Crevice mechanism: Ein kleiner Teil des eingebrachten Methankraftstoffes gelangt in den Feuerstegbereich zwischen Laufbuchse

und Kolben. Dieser Anteil kann aufgrund der relativ kalten und strömungstechnisch für die Flamme schwer zu erreichenden Position nicht an der Verbrennung teilnehmen.

- Short Circuiting: Die motor- und betriebsspezifisch applizierte Ventilüberschneidung (Ein- und Auslassventil kurz zeitgleich geöffnet) hat den Nachteil, dass je nach thermodynamischen Randbedingungen, wie z. B. stark positivem Spülgefälle, bei PFI (Port Fuel Injection) eine bestimmte Menge des eingedüsten Kraftstoffes direkt unverbrannt vom Einlass ins Auslass gespült werden.
- Partial Burning (Flame Quenching): Der Effekt beschreibt, dass die im Brennraum eingebrachte Kraftstoffmasse aufgrund von zu niedrigen Temperaturen in etwaigen Randzonen oder lokal ungünstigen Mischbedingungen während der Brenndauer nicht vollständig verbrennt.

Die durch Spalt Mechanismen (Crevice) verursachten Methanemissionen wurden mittels eines geläufigen Ansatzes basierend auf dem Idealen Gasgesetz abgebildet. Dazu wird ein anhand der Zylindermaße berechnetes Spaltvolumen bestimmt. Die Berechnung der Spalt-Methanmasse im PFI-Modus erfolgt unter der Annahme, dass im Spalt nahezu gleiche

Druck-, Temperatur- und Luft-Kraftstoff-Verhältnisse herrschen wie im Brennraum. Diese Annahme ist im ND- Verfahren naheliegend, da hier von einer nahezu vollständigen Homogenisierung ausgegangen wird. Im MD- bzw. HD- Verfahren mit direkter (und später) Eindüsung des Kraftstoffes ist davon auszugehen, dass sich der Kraftstoff vor Brennbeginn fast vollständig im Zentrum des Zylinders (Brennzone) befindet, sodass weniger bis quasi keinen Methanschlupf durch Spalt Mechanismen erwartet wird.

Diese Schichtladungseffekte können mittels 0D/1D-Modellierung nicht allein abgebildet werden, weswegen in Zusammenarbeit mit

dem LKV Rostock eine Reihe rechenaufwendiger 3D-CFD-Simulationen durchgeführt wurden, durch die der Mischprozess des Methan-Luftprozesses in Abhängigkeit der Kraftstoff-Eindüse-Timings nachvollzogen werden kann. Aus den daraus erhaltenen Resultaten wurde jeweils eine Approximationsformel entwickelt, mithilfe derer eine Näherung des lokalen Lambdas in Wandnähe bzw. zentraler Zone ermittelt werden kann.

Diese Luft-Kraftstoffverhältnisse gehen zum einen ins Crevice-Submodell als auch in das Submodell zur Modellierung der oben genannten Partial Burn Effekte ein. Weiteres Modell wurde unter simplifizierenden Annahmen aus einer homogenen Differentialgleichung 1. Ordnung abgeleitet (Lösung – siehe Gleichung (2)). Die hierbei als konstant angenommene Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k wird durch eine Korrelationsformel aus [5], [6] der laminaren Flammengeschwindigkeit von Methan bestimmt, in die wiederum die Druck- und Temperaturbedingungen sowie das berechnete lokale Lambda der zentralen Zone eingehen.

$$S_L(\phi) = S_{L,max} \cdot \phi^{-0.2} \cdot e^{-6.45 \cdot (\phi - 1.08)^2} \cdot \left(\frac{T_u}{T_0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{p_u}{p_0}\right)^\beta \quad (1)$$

$$S_{L,max} = 38,85 \frac{\text{cm}}{\text{s}}, \alpha = 4,9199 \cdot \phi^2 - 10,287 \cdot \phi + 6,9258, \beta = -1,3712 \cdot \phi^2 + 2,6808 \cdot \phi - 1,7492.$$

$$m_{CH_4}(EOC) = a \cdot m_{CH_4}(SOC) \cdot e^{b \cdot S_L^2(\phi_{local})(EOC - SOC)} \quad (2)$$

Dieser Ansatz folgt der Überlegung, dass die Güte der Brennbedingungen vor Zündung durch die Indikatorgröße der erwartete laminare Flammengeschwindigkeit näherungsweise bemessen werden kann. Die unbekannten Parameter a und b des Modells wurden anhand der zugehörigen Methanmessungen am Prüfstand angepasst. Die Simulationsergebnisse der Methanemissionen aus Partial Burn Effekten zeigen trotz der stark vereinfachten Darstellung im 0D/1D-Modell gute Übereinstimmungen mit den Messungen, sodass eine Potentialabschätzung verschiedener Eindüsestrategien hinsichtlich einer optimalen Verbrennung möglich ist.

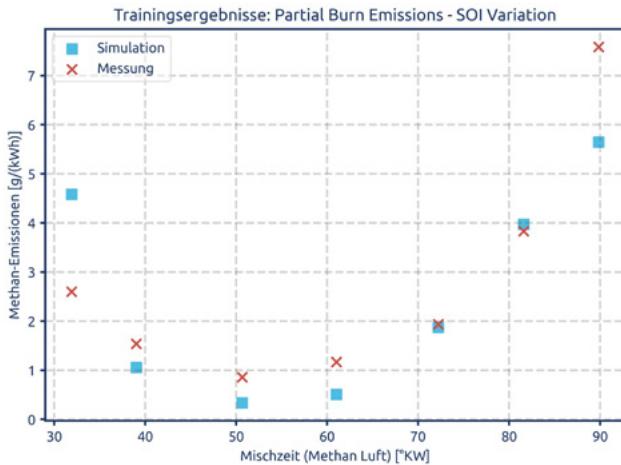


Abb. 14: Methanemissionen verursacht durch Partial Burn Effekte in Abhängigkeit der Mischzeit von Methan mit Luft im MD-Betrieb

Um die sich aus der Ventilüberschneidung ergebenen Überstromeffekte und die daraus resultierenden Emissionen vorherzusagen, wurde der Gaspfad inklusive Ein- und Auslasstrakt des 1-Zylinder-Motors näherungsweise eindimensional nachgebildet. Sofern wie in AVL Cruise M die anderen Emissionsphänomene gesondert als Submodelle berechnet werden, also nicht Teil der Massenbilanz im Motormodell sind, lässt sich die Menge an unverbrannten Methan durch das Short-Circuiting durch Integration des Methanmassenstroms (bei positivem Spülgefälle) im Abgasstrang ermitteln. Im Falle der Direkteindüsung des Methans (bei MD / HD) ist diese Menge wie zu erwarten gleich Null.

Die beschriebenen Modellbestandteile konnten erfolgreich in eine FMU (Functional Mockup Unit) basierend auf der Software FMUSDK Qtronic / Synopsis mit integriertem Windows / Linux-Compiler eingebunden werden, sodass diese in andere Softwareumgebungen nutzbar sind.

Der Export / die Verknüpfung der FMU mit anderen Softwareprodukten sowie die Testung der beinhaltenden Methanschlupf-Submodelle wurden erfolgreich durchgeführt.

5. Technische Innovationen innerhalb des Projektes

Im Laufe des Projektes wurden eine Reihe von technischen Neuerungen am Prüfstand umgesetzt und die Infrastruktur um diverse Teilsysteme erweitert. Durch die Realisierung dieser Systeme konnten angestrebte Projektziele unmittelbar umgesetzt und die Brennverfahren noch detaillierter analysiert werden. Diese Technologiepakete stehen nun für zukünftige Forschungsprojekte zur Verfügung:

- Gekühlte Hochdruck – AGR-Strecke mit bis zu 30 % AGR-Rate bei Volllast
- Erweiterung der Gasmischsanlage für Wasserstoffzumischraten von bis zu 30 vol.-% bei Volllast; bis > 70 vol.-% bei Teillast
- Abgasbypassstrecke zur Untersuchung von bis zu zwei Standardkatalysatoren mit Analyse der Abgaszusammensetzung vor und nach dem Katalysator
- Ausbau der Brenngasinfrastruktur um einen Hochdruck Brenngasverdichter (bis 500 bar) sowie Gasinjektoren in zwei Ausführungen für das Mitteldruck- (10 – 80 bar) sowie Hochdruckverfahren (100 – 500 bar)
- Anpassung des Forschungsmotors für Brennverfahrungsuntersuchungen mit Gasdirekteinblasung
- Aufbau / Erweiterung der Komponentenprüfstände für Gas-DI-Injektoren: Anpassung des Hochdruck-Hochtemperatur Einspritzkammer für optische Untersuchungen der Gemischbildung sowie Aufbau eines Einblaseratenverlaufsindikators für Untersuchungen und sicherheitsgerichtete Funktionstests der Gas-DI-Injektoren.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen von TEME2030+ wurden erfolgreich eine Reihe relevanter Technologiekonzepte in Bezug auf das Treibhausgasminderungspotenzial von mittelschnelllaufenden DF-Motoren untersucht. Ziel war die Potenzialanalyse und der Vergleich der verschiedenen Konzepte, unter anderem auch in Bezug auf Retro-Fit Anwendungen. Im Rahmen des ersten Projektschwerpunkts wurden detaillierte experimentelle Analysen zum Niederdruck-Brennverfahren durchgeführt.

Für die Untersuchungen bezüglich Abgasrückführung wurde am Einzylindermotor eine AGR-Strecke erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Im Niederdruck-Brennverfahren, welches prinzipbedingt bereits auch ohne Abgasnachbehandlung niedrige NO_x Emissionen aufweist, konnte die AGR genutzt werden, um die NO_x Emissionen noch weiter zu senken. Zusätzlich konnten auch die THG Emissionen direkt (durch direkte Reduzierung der CH₄ Emissionen) sowie indirekt (durch Betriebspunktverschiebung auf NO_x-CH₄-Trade-Off infolge reduzierter NO_x Emissionen) gesenkt werden. Leichte Wirkungsgradverluste konnten diesbezüglich durch den reduzierten Methanschlupf ausgeglichen werden. Während AGR in diesem Projekt den ND-Technologien zugeordnet wurde, zeigte sich die AGR insbesondere auch beim Mitteldruck-Schichtladungsbrennverfahren, welches prinzipbedingt mit hohen NO_x Emissionen einhergeht, als effektives Mittel, um diesem signifikanten Emissionsnachteil gegenüber dem ND-Brennverfahren entgegenzuwirken.

Als weitere Option wurde Wasserstoffzumischung zum Erdgas zur Reduktion der Treibhausgasemissionen experimentell untersucht. Mit einer geeigneten Regelungsstrategie (Schwerpunktregelung) und den Freiheitsgraden, die ein Common-Rail Pilotsystem mit sich bringt, konnten ohne Änderungen am Motor selbst (keine Soft- & Hardwareanpassung am Motor oder Kraftstoffsystem) die Treibhausgasemissionen reduziert werden. Bereits geringe Wasserstoffmengen führten zu einer überproportionalen Reduktion der Treib-

hausgasemissionen: sowohl durch die CO₂ Reduktion aufgrund der Substitution von Erdgas durch Wasserstoff, als auch durch Wirkungsgradvorteile und eine zusätzliche CH₄ Reduktion durch ein verbessertes Ausbrandverhalten des Erdgas / Wasserstoff Gemischs.

Die Versuche mit einem Methanoxidationskatalysator zeigten prinzipiell ein erhebliches Potenzial. In experimentellen Versuchen am Einzylindermotor wurden am Katalysator CH₄-Umsatzraten von >85 % erreicht. Jedoch stellte die schnelle Deaktivierung durch den hohen Wassergehalt im Abgas eine kritische Herausforderung dar. Um das grundsätzlich nachgewiesene, hohe Potenzial auch langfristig nutzen zu können sind weitere Forschung und Entwicklungsschritte notwendig, um diese Technologie für den Langzeitbetrieb bereitzustellen.

Die Brennverfahrensentwicklungen mit Mittel- und Hochdruck-Gasdirekteinblasung bildeten die zweite und dritte Säule des Projekts. Dafür wurden die Infrastruktur und der Prüfstand umfassend erweitert. Hauptbestandteil war der Hochdruck-Brenngas-verdichter und eine Brenngas-Infrastruktur, die beide Druckniveaus abdeckt. Ein Wechsel des Brennverfahrens ist somit am Forschungsmotor durch einen Austausch der Gas-DI Injektoren (MD oder HD Variante) einfach möglich. Aufgrund des hohen Neugkeitscharakters der DI-Brennverfahren wurden diese mit umfassenden Voruntersuchungen mittels 3D-CFD Simulation der Gemischbildung und Verbrennung sowie Untersuchungen der Prototypen-Injektoren an Komponentenprüfständen begleitet. Mithilfe der Voruntersuchungen konnten für die Experimente am Einzylinderr Forschungsmotor die Betriebsparameter sowie die Hardware-Kombinationen (Kolbengeometrie, Injektorstrahlführung) auf zwei Strategien für das MD-Brennverfahren eingegrenzt werden. Bei saughub-synchroner Einblasung, verbunden mit ausreichend Zeit für eine gute Ladungshomogenisierung, konnte ein Brennverfahren entwickelt werden, welches eine starke Ähnlichkeit zur ND-Referenz zeigte, allerdings mit dem Vorteil der Eliminierung des Methanschlups durch die Ventilüberschneidung. So konnten die CH₄ Emissionen in einem weiten

Betriebsbereich um 20 % bis 45 % gesenkt werden. Die große Übertragbarkeit vom ND-Brennverfahren wirkt sich vorteilhaft auf die Entwicklung, Konstruktion und Parametrierung eines solchen Motors bzw. Brennverfahrens aus, da bis auf das Kraftstoffsystem keine weiteren Änderungen notwendig sind.

Weiter reduziert werden konnte der Methanschlupf mithilfe des untersuchten Schichtladungsbrennverfahrens. Aufgrund leichter Wirkungsgradnachteile gegenüber dem Homogenbetrieb zeigte sich das volle Potenzial erst mit weiteren Optimierungen der Betriebsstrategie, beispielsweise mit AGR für die Stickoxidreduktion und einer optimierten Pilot-Mehrfacheinspritzungsstrategie. Die damit erreichbaren THG Vorteile gehen jedoch mit einem stark erhöhten Entwicklungsaufwand einher. Das Schichtladungsbrennverfahren erfordert eine sehr sensibel abgestimmte Einblasestrategie in Kombination mit dem Hardware-Setup, um den gewünschten Effekt der Ladungsschichtung zu erreichen und voll auszuschöpfen. Dieser erhöhte Aufwand muss gegenüber dem zusätzlichen Nutzen beispielsweise in Bezug auf CO₂ Ausgleichszahlungen und Kraftstoffkosten berücksichtigt werden und ist noch teil laufender Analysen. Die Kosten für die Druckbereitstellung und die Injektortechnologie (einschließlich Wartung) werden für dieses MD-Brennverfahren jedoch als vergleichsweise niedrig eingeschätzt, was eine Markteinführung unterstützen könnte.

Ein gegenüber den MD-Brennverfahren deutlich erhöhter Systemaufwand wurde für die Untersuchungen des HD-Brennverfahrens vorgenommen. Mit dem erforderlichen hohen Druckniveau ging ein stark erhöhter Aufwand für die Kraftstoffinfrastruktur sowie die abgewandelte Injektorvariante einher. Ziel war es, auf Basis eines Diffusionsbrennverfahrens den Methanschlupf zu minimieren und den Wirkungsgrad durch eine Steigerung des Verdichtungsverhältnisses zu maximieren. Auch dieses Brennverfahren konnte im Rahmen von TEMA2030+ erfolgreich appliziert und wichtige Erkenntnisse bezüglich des Wirkungsgrads und der Emissionen, sowie hinsichtlich der Anforderungen an die Injektoren erlangt

werden. Detaillierte Ergebnisse dieser Untersuchungen werden u. a. im Abschlussbericht und weiteren folgenden wissenschaftlichen Beiträgen veröffentlicht.

In Zusammenarbeit mit der FVTR GmbH konnte ein Methanschlupfmodell für die Einbindung in übergeordnete 0D / 1D Modelle entwickelt werden. Dieses wurde mit Unterstützung von 3D-CFD Simulationen und experimentellen Ergebnissen der Motorversuche auf die unterschiedlichen Brennverfahren hin optimiert und validiert. Damit soll für zukünftige Entwicklungen und Industrieaufträge der Aufwand von 3D-CFD Simulationen deutlich reduziert und durch 0D / 1D Simulationen, die deutlich weniger Rechenleistung benötigen, unterstützt werden können. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann die FVTR GmbH ihr Produktpotential für zukünftige Industrieprojekte erweitern.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit Schaller Automation, wurde auch der Einfluss auf die Kurbelgehäuseatmosphäre in Bezug auf Wasserstoff- und Methankonzentrationen innerhalb der verschiedenen Motor- Eindüsungsverfahren, Motorlast, sowie Wasserstoffbeimischungen untersucht, bzw. die Konzept-Entwicklung eines selektiven Gassensors, „GasMOS-H₂“, zur stetigen Überwachung der Gaszusammensetzung (Blow-by) im Kurbelgehäuse, mit experimentellen Daten vom Einzylinderprüfstand 1/34DF unterstützt. Aufgrund der gewonnenen Prüfstandsdaten, konnte das Sensorkonzept in realer Einsatzumgebung erfolgreich getestet und somit ein Technology Readiness Level 6 (TRL6) erreicht werden, was einen wichtigen Meilenstein zur geplanten Serienproduktion darstellt.

Durch das Forschungsprojekt konnten wichtige Erkenntnisse für die einzelnen Projektpartner erlangt und die Kooperation der beteiligten Firmen auch untereinander gestärkt werden. In Zusammenarbeit mit M. JÜRGENSEN konnte beispielsweise die Verteilung der Laufbuchsentemperatur gemessen werden. Dies lieferte einerseits wichtige Randbedingungen für die Simulation, außerdem kann dadurch beispielsweise die thermische Belastung der Laufbuchse bei verschiedenen Technologiekonzepten wie Wasserstoffzumischung besser abgeschätzt werden. Aus diesen Erkenntnissen

können Maßnahmen für die Produktion von zukünftigen Laufbuchsen abgeleitet werden. KS Large Bore Pistons hat einerseits bei der Fertigung des Kolbenoberteils für die Schichtladung unterstützt, andererseits konnten auch unterschiedliche Ringnut-Fertigungsverfahren sowie der Einfluss von Wasserstoff auf den Ringnutverschleiß untersucht werden. Die verschiedenen Kolbenvarianten wurden u. a. auch in Zusammenarbeit mit Schaller Automation hinsichtlich des Einflusses auf das Blow-by untersucht. Mit Kompressorenbau Bannewitz wurden die unterschiedlichen Technologiekonzepte und deren Auswirkungen auf den Abgasturbo-lader untersucht. Konzepte wie AGR oder das Schichtladungsbrennverfahren wirken sich dabei beispielsweise primär auf den absoluten Luft-/Abgasmassenstrom aus, Wasserstoffzumischung dagegen hauptsächlich auf die Abgaszusammensetzung.

Im Rahmen von TEME2030+ konnten umfangreiche Untersuchungen zu zukünftigen Technologiekonzepten für DF-Motoren durchgeführt werden. Die Ergebnisse bilden eine gute Vergleichsbasis für die untersuchten Konzepte, da alle Untersuchungen auf der gleichen Power-Unit durchgeführt wurden. Die für die Untersuchungen der verschiedenen Technologiekonzepte notwendigen Anpassungen der Prüfstandsinfrastruktur (Erdgas-HD-Verdichter, H₂-Mischstrecke, AGR-System, AGN-Teststrecke) stehen für zukünftige Forschungs- und Kooperationsprojekte zur Verfügung und können auf weitere zukünftige Kraftstoffe angepasst werden.

Umfangreichere Analysen und direkte Vergleiche unterschiedlicher Technologien werden und wurden bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Beiträgen veröffentlicht [1-3, 7-12], sodass auf Basis der Projektergebnisse zukünftige Entwicklungsrichtungen für mittelschnelllaufende DF-Motoren mit methanbasiertem Kraftstoff definiert werden können.

Danksagung

Die Autoren möchten sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ehemals Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) für die Förderung des Projektes TEME2030+ (Förderkennzeichen 03SX537C) bedanken.

Darüber hinaus gilt unser Dank den Projektpartnern Schaller Automation GmbH & Co. KG und FVTR GmbH, sowie den assoziierten Projektpartnern Kolbenschmidt KS Large Bore Pistons Germany GmbH, M. JÜRGENSEN GmbH & Co. KG, Kompressorenbau Bannewitz und Umicore AG & Co. KG.

Literatur

- [1] Seipel, P., Glauner, M., Dinwoodie, J., Buchholz, B. „Effects of Varying the Air-Fuel Equivalence Ratio at Different EGR-Rates on a Medium-Speed LNG-Diesel Dual-Fuel Engine“ (2025), SAE Technical Paper 2025-24-0041 <https://doi.org/10.4271/2025-24-0041>
- [2] Glauner, M., Schleef, K., Dinwoodie, J., Cepelak, S., Theile, M. (2025) „Lowest GHG Emissions on Medium-Speed Engines by higher Epsilon and H₂ Admission to the Fuel Gas“, CIMAC Congress 2025, Zürich, Schweiz, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15191332>
- [3] Seipel, P., Glauner, M., Cepelak, S., Dinwoodie, J., Schleef, K., Buchholz, B., Bank, R. „Experimental Long-Term Study of a Methane Oxidation Catalyst on a Medium-Speed Dual-Fuel Engine“ CIMAC – Congress, Zürich, 19th – 23rd May 2025, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15191505>
- [4] M. V. Jensen, R. F. Cordtz, und J. Schramm, „Numerical analysis of methane slip source distribution in a four-stroke dual-fuel marine engine“, J. Mar. Sci. Technol., Bd. 26, Nr. 2, S. 606 – 617, Juni 2021, doi: 10.1007/s00773-020-00760-3.
- [5] R. Amirante, E. Distaso, P. Tamburrano, und R. D. Reitz, „Laminar flame speed correlations for methane, ethane, propane and their mixtures, and natural gas and gasoline for spark-ignition engine simulations“, Int. J. Engine Res., Bd. 18, Nr. 9, S. 951 – 970, Nov. 2017
- [6] J. Warnatz, U. Maas, und R. W. Dibble, „Laminar Premixed Flames“, in Combustion, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996, S. 107 – 120. doi: 10.1007/978-3-642-97668-1_8.

- [7] Dinwoodie, J.C.; Cepelak, S.; Glauner, M., Seipel, P.; Schleef, K.; Buchholz, B.; Theile, M. „3D – CFD Simulation of Direct Gaseous Injection for a Medium Speed Dual-Fuel Engine“, 8. RGMT, Rostock 2024; https://doi.org/10.18453/rosdok_id_00004649
- [8] Dinwoodie, J.C., Cepelak, S., Glauner, M., Seipel, P., Schleef, K., Buchholz, B., Theile, M. „Numerical Analysis of a Medium Pressure Gaseous Direct Injector on a Marine Medium Speed Dual-Fuel Engine“, MTZ Heavy Duty-, On and -Off Highway Motoren Tagung, Eisenach 2024
- [9] M.Sc. Pascal Seipel, M. Sc. Jules Dinwoodie, M. Sc. Sebastian Cepelak, M. Sc. Manuel Glauner, Dr.-Ing. Karsten Schleef, Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz. „Experimental and Numerical Study of Multiple Injection Strategies using a Medium Pressure Gas Injector for Medium Speed Dual Fuel Engines“ 13. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe, 8. – 9. Mai 2025, Dessau-Roßlau
- [10] Dinwoodie, J.C., Cepelak, S., Glauner, M., Seipel, P., Schleef, K., Buchholz, B., Theile, M. „Numerical and experimental analysis of gas DI operation on a medium-speed dual-fuel marine engine“, CIMAC Congress 2025, Zürich, Schweiz, 19th – 23rd Mai 2025, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15269752>
- [11] Dinwoodie, J.C., Cepelak, S., Glauner, M., Seipel, P., Buchholz, B., Theile, M. „A 3D-CFD Analysis of Gas Direct Injection for a Dual-Fuel Medium Speed Marine Engine, MARINE, XI Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Juni 2025, Edinburgh, Schottland
- [12] Glauner, M., Seipel, P., Dinwoodie, J., Cepelak, S. Buchholz, B. „Experimental Investigations on Medium Pressure Direct Gas Injection on a Medium-Speed Dual-Fuel Single-Cylinder Engine“, 20th Symposium „Sustainable Mobility, Transport and Power Generation“, 4th – 5th September 2025, Graz, Österreich

CIAM

Cooperative Development of a Comprehensive Integrated Autonomous Underwater Monitoring Solution

Autorenliste

Universität Rostock, LKV

Peter Kampmann

Ulrich Hofmann

Leif Christensen

Matthias Golz

Harald Sternberg

Emanuel Wenzlaff

Matthias Mischke

Jens Wunderlich

Gunnar Brink



1. Einleitung und Motivation

Unterwasserkabel und -Pipelines bilden die verdeckten Lebensadern der modernen Gesellschaft. Sie transportieren Energie, Daten und Rohstoffe weitgehend unsichtbar und schwer zugänglich. Die Inspektion und Überwachung dieser kritischen Infrastruktur stellt daher eine besondere technologische und logistische Herausforderung dar. Bisher werden entsprechende Aufgaben in der Regel von großen, bemannten Schiffen mit dynamischer Positionierung übernommen. Diese Einsätze sind teuer, personalintensiv und wetterabhängig.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Verbundprojekt CIAM wurde am 1. Mai 2021 gestartet, um technologische Grundlagen für eine neue Generation autonomer Unterwasserfahrzeuge (AUV) zu schaffen, die Inspektions- und Überwachungsaufgaben selbstständig, kosteneffizient und dauerhaft durchführen können. Das Projekt hat schon bald durch die Sabotage der Nord-Stream-Pipelines am 26. September 2022 eine besondere Aktualität erhalten. Die Ereignisse lenkten weltweit die Aufmerksamkeit auf die Verletzlichkeit von Unterwasserinfrastrukturen und zeigten, wie abhängig unsere Energie- und Kommunikationsnetze von sicher betriebenen, wenngleich meist unsichtbaren Systemen sind. Unterseeische Kabel und Pipelines gelten zunehmend als Teil der kritischen Infrastruktur, die sowohl hybriden Bedrohungen als auch wirtschaftlichen oder kriminellen Interessen ausgesetzt ist.

Eine nachhaltige Lösung kann nur in unbemannten, hochautonomen Systemen liegen, die Inspektionen ohne Begleitschiff durchführen und damit unabhängig von Wetterfenstern und logistischen Einschränkungen arbeiten können.

Genau hier setzte CIAM an: Ziel war die Entwicklung von vollautonomen AUVs, die Pipelines und Kabel selbstständig finden, vermessen und inspizieren, ohne dass menschliche Eingriffe während der Mission erforderlich sind.

Das Projekt verfolgte damit zugleich mehrere übergeordnete Ziele des Nationalen Masterplans Maritime Technologien:

- die Entwicklung langzeittauglicher (teil-)autonomer Systeme,
- die Digitalisierung und Effizienzsteigerung in der maritimen Branche,
- die Stärkung des Innovationsstandorts Deutschland im Bereich Unterwasserrobotik,
- sowie die Reduktion von Sicherheitsrisiken für Mensch und Umwelt.

Im Projekt konnten mehrere Feldversuche und Validierungen unter realen Einsatzbedingungen erfolgreich abgeschlossen werden. Diese fanden in der Weser, im Mittelmeer, in italienischen und spanischen Küstengewässern, bei Helgoland und vor der schottischen Küste statt.

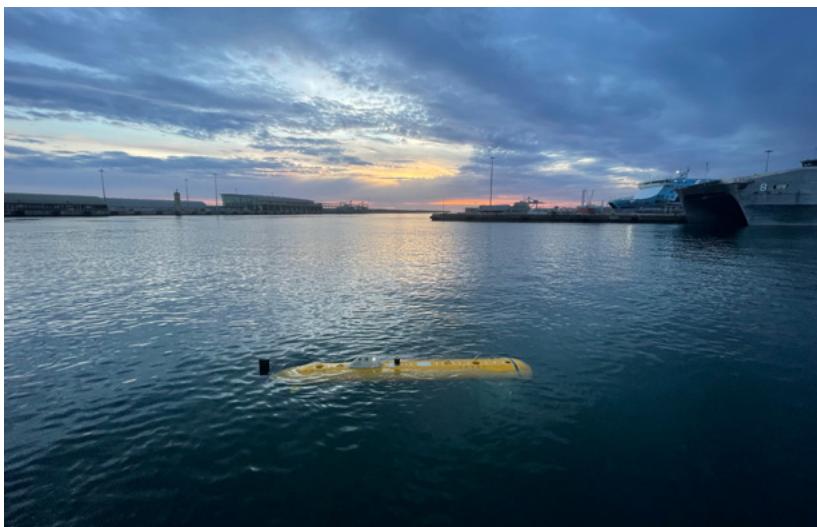


Abb. 1: Feldtest eines AUV vor Civitavecchia (Italien) im Rahmen des CIAM Projektes.

Mit der Kombination aus technischer Systementwicklung, software-basierter Autonomie und neuen Sensorprinzipien leistet CIAM einen Beitrag zur Transformation der maritimen Industrie in Richtung automatisierter, vernetzter und sicherer Unterwassertechnologien. Die im Projekt entwickelte Plattform bildet zugleich die Grundlage für den Aufbau eines kommerziellen Serviceangebots bei Rosenxt, das autonome Inspektionen maritimer Infrastrukturen ermöglicht.

2. Projektstruktur und Konsortium

Das Verbundprojekt CIAM wurde im Rahmen des Maritimen Forschungsprogramms durch das jetzige Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert. Das Projekt startete am 1. Mai 2021 und lief mit einer bewilligten Dauer von 42 Monaten bis Ende Oktober 2024. Aufgrund der erfolgreichen Projektfortschritte und des Bedarfs zur Ergebnisvalidierung wurde eine kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate bis April 2025 genehmigt.

Ziel des Verbunds war die Entwicklung und Validierung einer modularen, skalierbaren Plattform für autonome Unterwasserfahrzeuge (AUV), die in der Lage sind, Inspektionsaufgaben an Pipelines, Kabeln und anderen maritimen Infrastrukturen vollständig autonom durchzuführen – vom Start im Hafen bis zur Rückkehr dorthin („Port-to-Port-Missionen“).

Das Konsortium vereinte führende deutsche Forschungseinrichtungen und Industriepartner mit komplementären Kompetenzen in Robotik, Sensorik und Meerestechnik.

- Rosenxt Creation Center GmbH (vormals ROSEN Group) – Projektkoordination, Systemintegration, AUV-Design und Feldtests
- Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Bremen – High-Level-Navigation, Testbeckenversuche, semantische Umweltrepräsentation

- Technische Universität Berlin – Modellierung und Regelung der autonomen Dockingstation
- Universitätsklinik Freiburg, Sektion für neuroelektronische Systeme – Entwicklung elektrochemischer Sensorik mit Platin und eingebettet Potentiostat-Systeme
- GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel – Optische 3D-Sensorik und Kamerasyteme
- Innomar GmbH, Rostock – Sub-Bottom-Profiler und akustische Sensorik
- balticFuelCells GmbH, Schwerin – Energieversorgung mittels sauerstoffbetriebener Brennstoffzelle integriert in einen Druckkörper
- FormLED GmbH, Karlsruhe – Hocheffiziente LED-Beleuchtungs-systeme (bis zur Insolvenz im Projektverlauf)
- HafenCity Universität Hamburg (HCU) – Sensordatenfusion, Navigationsalgorithmen und semantischen Umweltmodellierung. Entwicklung von Kalman-Filter-basierte Algorithmen, zur Positionsbestimmung insbesondere bei dynamischen Bewegungen

Die Zusammenarbeit wurde durch regelmäßige Konsortialtreffen und jährliche Projektmessen gestützt.

Während der Projektlaufzeit kam es zu zwei bedeutenden strukturellen Veränderungen: Die ROSEN Group mit ihren Mehrheitsanteilen wurde an eine Private-Equity-Gesellschaft verkauft. Im Zuge dieser Umstrukturierung wurde der Geschäftsbereich Subsea Solutions, der unter anderem auch das CIAM Projekt koordinierte, mit weiteren innovationsnahen Einheiten 2023 in die neu gegründete Rosenxt Creation Center GmbH überführt.

Im Projektverlauf musste zudem der Projektpartner FormLED GmbH (Karlsruhe), ein kleines Unternehmen mit Spezialisierung auf Tiefsee-Beleuchtungs- und Elektroniksysteme, Insolvenz anmelden. Nach Abschluss des Insolvenzverfahrens konnte es seine Aktivitäten in der Tiefseeelektronik unter der Marke Aequonics fortführen, war jedoch nicht mehr Teil des CIAM-Konsortiums.

Die von FormLED ursprünglich übernommenen Entwicklungsaufgaben, insbesondere im Bereich der Hochleistungsbeleuchtung für Kamerasyteme sowie der Antriebselektronik, wurden von anderen Partnern teilweise kompensiert. Diese Resilienz im Konsortium ermöglichte es, die technischen Projektziele trotz des Ausfalls zu erreichen.

3. Wissenschaftlich-technische Ziele

Das Verbundprojekt CIAM verfolgte das Ziel, grundlegende Technologien für eine neue Generation intelligenter, autonomer Unterwasserfahrzeuge (AUV) zu entwickeln. Diese Systeme sollen in Zukunft Inspektions-, Überwachungs- und Analyseaufgaben an Pipelines, Kabeln und Offshore-Infrastrukturen eigenständig durchführen können: vom Start im Hafen bis zur Rückkehr („Port-to-Port-Missionen“).

Sowohl Fahrzeugentwicklung als auch Softwarekonzepte wurden deshalb von Beginn an auf autonomes Langzeitverhalten ausgelegt. Hierzu gehörte insbesondere die Fähigkeit, Missionsparameter eigenständig anzupassen, Störungen zu erkennen und den Betrieb sicher fortzusetzen.

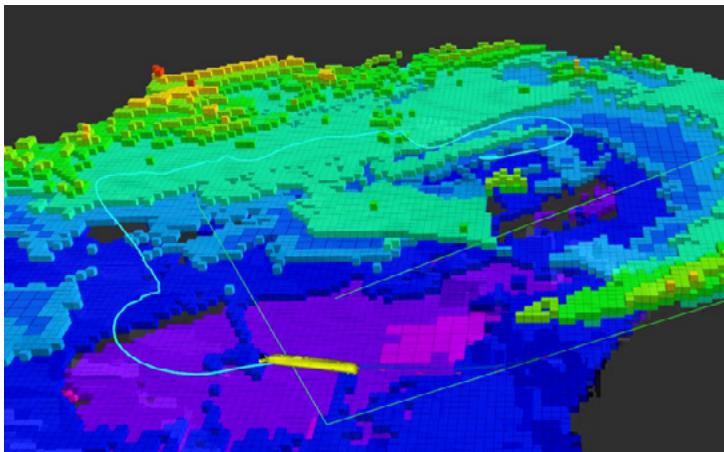


Abb. 2: Collision Avoidance spielt eine zentrale Rolle innerhalb der autonomen Navigation der bei CIAM entwickelten AUVs

Ein Schwerpunkt lag auf der autonomen Navigation im Nahbereich – etwa beim Andocken, bei Pipeline-Verfolgungen oder bei der Untersuchung komplexer Strukturen. In Zusammenarbeit mit der TU Berlin und dem DFKI Bremen wurde eine neuartige Dockingstation entwickelt, die selbst als Robotersystem agiert und über acht Aktuatoren mit integrierter Sensorik (IMU, DVL, USBL, Kameras) verfügt. Das System erreichte eine autonome Andockquote von rund 70 % in realen Testumgebungen.

Die in CIAM entwickelten Navigationsverfahren kombinierten modellbasierte Missionsplanung, Online-Situationsbewertung und multimodale Umgebungserfassung. Damit wurde die Grundlage für autonome Langstrecken- und Port-to-Port-Missionen gelegt.

Zur Kommunikation und Datenübertragung unter Wasser wurden verschiedene Kommunikationsmethoden (z. B. modulierte elektrische Ströme und optische Lichtpulse) erprobt. Ziel war eine bandbreitenstarke, störungssarme Datenübertragung für den Austausch zwischen AUV, Dockingstation und Oberflächeneinheiten. Die erzielten Ergebnisse verbesserten das Verständnis der Signalmodulation in stark streuenden marinen Umgebungen erheblich.

Die AUVs wurden mit einem multimodalen Sensorsystem ausgestattet, bestehend aus Sonar-, Magnetfeld-, Kamera-, Laser- und elektrochemischer Sensorik. Durch On-Board-Vorauswertung und adaptive Aktivierung einzelner Sensoren konnte der Energieverbrauch signifikant reduziert werden.

Die Integration unterschiedlicher Sensordaten ermöglichte eine robuste Objekterkennung und semantische Umweltbeschreibung, die mithilfe maschineller Lernverfahren realisiert wurde. Dadurch ließen sich Objekte wie frei hängende Pipelineabschnitte, Steine oder Beschwerungsmatratten automatisch erkennen und klassifizieren.

Neben der Verbesserung der Softwareeffizienz wurde ein hocheffizienter Antrieb mit 71 % Wirkungsgrad entwickelt. Gemeinsam mit der baltic Fuel Cells GmbH entstand ein Labordemonstrator für eine mit reinem Sauerstoff betriebenes druckneutrale Brennstoffzellen-System, die das mittelfristig als Energiequelle für Langzeitmissionen dienen soll. Durch die Kombination dieser Ansätze wurde eine Reichweite von rund 100 Seemeilen erreicht – ein wesentlicher Fortschritt gegenüber bisherigen batteriegetriebenen Systemen.

Kern des Projekts war die Entwicklung eines modularen Baukastensystems, das den Aufbau verschiedener AUV-Konfigurationen erlaubt. Dieses Konzept erlaubt die Realisierung sowohl von Survey-Type- als auch von Hovering-Type-Fahrzeugen, die sich flexibel an Missionsanforderungen anpassen lassen. Der modulare Ansatz erleichtert Wartung, Erweiterung und spätere Serienfertigung.

Mit den im Projekt entwickelten Fahrzeugen für 1000 m und 5000 m Tauchtiefe wurden neue Standards in der Tiefseerobotik gesetzt. Das Design wurde so ausgelegt, dass Sensoren, Energiequellen und Steuerungseinheiten austauschbar sind. Durch diese Architektur kann das System in Zukunft auch für Aufgaben in der Öl-, Gas- und Wasserstoffwirtschaft eingesetzt werden.

Das Hauptziel von CIAM (die autonome Inspektion und Zustandsbewertung von Pipelines und Kabeln) konnte in Feldversuchen erfolgreich demonstriert werden. Das AUV war in der Lage, verlegte Leitungen selbstständig zu finden, zu verfolgen und nach temporärem Verschwinden im Sediment wiederzufinden.

Parallel wurde ein automatisiertes Berichtssystem entwickelt, das die im Einsatz gewonnenen Sensordaten verarbeitet und standardisierte Inspektionsreports erstellt – ein entscheidender Schritt in Richtung industrieller Anwendung.

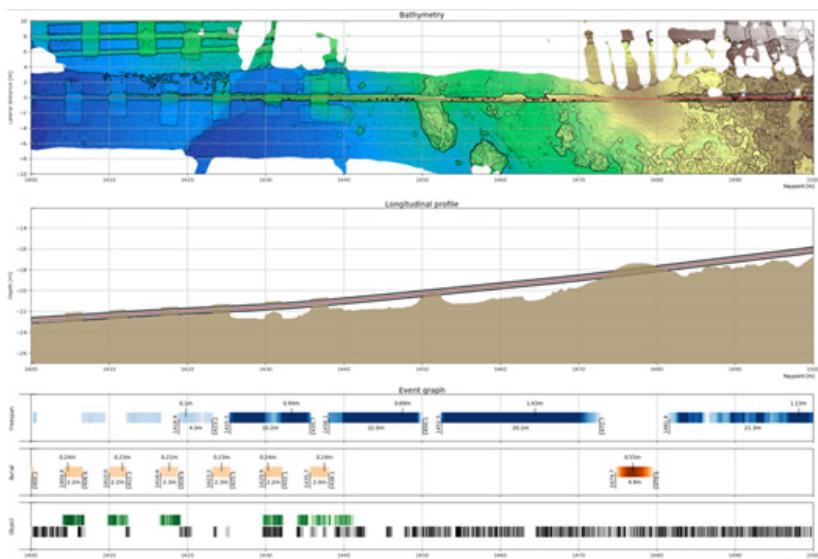


Abb. 3: Die Inspektion von Pipelines wurde an verschiedenen Strukturen im Mittelmeer erprobt und die resultierenden Reports in Abstimmung mit potentiellen Kunden so erstellt, dass diese automatisiert analysiert und mit minimalen menschlichen Eingriff fertiggestellt werden können.

Mit Partnern wie Innomar GmbH und der Universitätsklinik Freiburg wurden neue Sensorprinzipien getestet: ein optimierter Sub-Bottom-Profiler zur Erfassung von Sedimentstrukturen sowie ein elektrochemisches Messsystem primär zur Erfassung elektrischer Felder, aber auch zur möglichen Detektion von TNT Rückständen im Meerwasser.

4. Beiträge der Partner und zentrale Ergebnisse

Das Projekt wurde als interdisziplinäres Verbundvorhaben konzipiert, um die technologischen Grundlagen für vollautonome, maritime Inspektionssysteme zu schaffen. Neben der Fahrzeug- und Softwareentwicklung bildeten Energieversorgung, Sensorintegration, Kommunikation und Dockingtechnologien die zentralen technischen Schwerpunkte. Rosenxt verantwortete die Gesamtsystemintegration, während Forschungspartner wie die TU Berlin, das DFKI, die Universitätsklinik Freiburg und GEOMAR gezielt Schlüsseltechnologien für Autonomie, Sensorik und Datenfusion entwickelten. Kleine und mittlere Unternehmen ergänzten das Verbundprojekt mit spezifischer Expertise in Energie- und Messtechnik.

Rosenxt

Im Verlauf des Projekts wurden ein modularer Baukasten und zwei voll funktionsfähige AUVs (RoX 1K und RoX 5K) entwickelt, konstruiert und getestet. Besonderes Augenmerk galt der Energieeffizienz und der Austauschbarkeit zentraler Komponenten, wie Antriebssystem, Energieversorgung, Sensorik und Kommunikationsschnittstellen.

Rosenxt führte umfangreiche Feldtests durch – in der Nordsee bei Helgoland, mehrfach in italienischen Gewässern, einmal in Spanien und zuletzt vor der schottischen Küste. Dabei konnten mehrere technologische Meilensteine erreicht werden:

- Autonomes Verlassen des Hafens (Port-to-Port-Mission),
- selbstständiges Auffinden und Verfolgen von Unterwasserpipes, auch bei teilweiser Sedimentüberdeckung,
- vollständige Inspektionsmissionen einschließlich autonomer Rückkehr,
- robuste Datenerfassung und automatisierte Berichtserstellung.

Das AUV konnte sogar in Szenarien, in denen Pipelines im Sediment verschwanden, deren Verlauf rekonstruieren und die Struktur nach mehreren Metern selbstständig wiederfinden.

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI)

Das DFKI Bremen verantwortete im Projekt CIAM die Entwicklung der High-Level-Navigation und war federführend an der Konzeption und Validierung einer autonomen Unterwasserdockingstation beteiligt. In enger Zusammenarbeit mit Rosenxt und der TU Berlin entstand ein System, das sich selbst als Robotereinheit versteht und aktiv am Dockingprozess teilnimmt.

Die Dockingstation ist mit acht Antrieben, IMU, DVL, Kameras und USBL-Kommunikation ausgestattet. Die Navigationsarchitektur des DFKI erlaubt ein stufenweises Annäherungsmanöver vom Fernbereich über mittlere Distanzen bis zum präzisen Endandocken. Im Testbecken des DFKI wurde das System erfolgreich validiert und erreichte eine autonome Andockquote von rund 70 %.

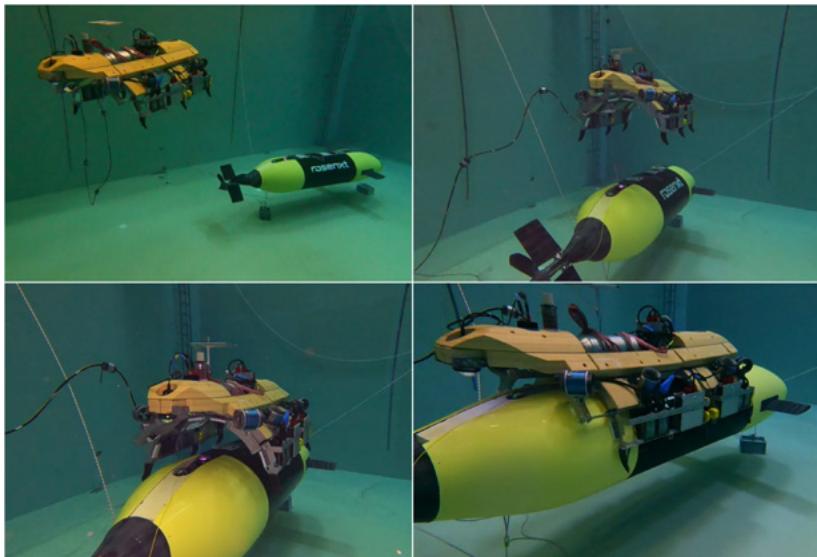


Abb. 4: Dockingversuche zwischen Dockingstation und AUV im Testbecken des DFKI

Zusätzlich entwickelte das DFKI Verfahren zur semantischen Umgebungsmodellierung und Missionsplanung, damit das AUV Missionsentscheidungen eigenständig treffen und sicherheitskritische Zustände erkennen kann.

Technische Universität Berlin

Die Technische Universität Berlin trug mit ihrer Expertise in der Regelungstechnik und Systemdynamik wesentlich zur Entwicklung der autonomen Dockingstation bei. Ihr Fokus lag auf der mathematischen Modellierung, Bewegungsregelung und Simulation des komplexen Kopplungsverhaltens zwischen Dockingstation und AUV unter Einfluss externer Strömungen.

Die TU Berlin implementierte ein adaptives Steuerungssystem, das Energieeffizienz, Präzision und Stabilität während des Dockingvorgangs gewährleistet. Die Simulationsergebnisse wurden in die Steuerlogik des realen Systems überführt und bei Tests im DFKI-Becken erfolgreich verifiziert. Damit leistete die TU Berlin einen zentralen Beitrag zur Feinnavigation und Steuerung innerhalb der autonomen Missionsführung.

Universitätsklinik Freiburg

In enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Elektrochemie der Universität Freiburg wurde im Rahmen von CIAM ein neuartiges elektrochemisches Sensorsystem auf Basis von Platin-Elektroden und einem embedded Potentiostat entwickelt. Damit gelang es erstmals, die elektrischen Felder eines Pipeline-Modells im Brackwasser direkt vom AUV aus zu messen: ein technologischer Durchbruch in der Unterwasser-Elektrochemie.

Während des Projekts sammelte das Team umfangreiche Erkenntnisse über das Verhalten von Platin als Elektrodenmaterial in aver-siven, aber pH-neutralen Medien (Meerwasser, Gehirn). Aufbauend auf diesen Erfahrungen entwickelt die Gruppe derzeit Sensoren mit Kohlenstoff-Elektroden, die eine Detektion von gelöstem TNT in Meerwasser ermöglichen.

Besonders hervorzuheben ist die geplante Ausgründung der Freiburger Forschergruppe, die sich auf elektrochemische In-situ-Sensorik für maritime und industrielle Anwendungen spezialisiert. Damit trägt das Teilvorhaben direkt zur wirtschaftlichen Verwertung und zum Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in marktfähige Lösungen bei.

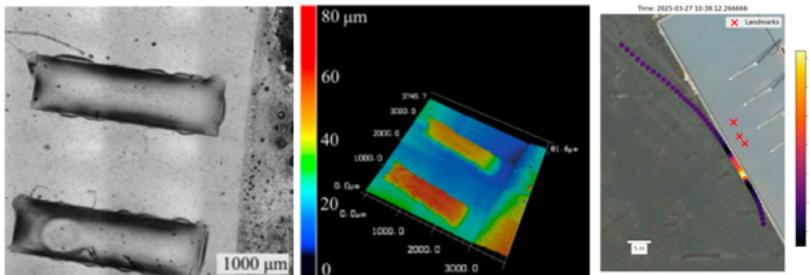


Abb. 5: (links) Hellfeld Aufnahme zweier Pt-Elektroden, die mit einer Hydrogel-Beschichtung von der Umgebungsströmung abgeschirmt wurden, nach ihrem Einsatz. (Mitte) Laser-Oberflächenscan derselben Elektroden. (rechts) GPS-Positionen des AUV bei einem Messlauf in der Weser. Die Farbe der Koordinate zeigt die Werte der dort im Wasser gemessenen Potentiale an. Deutlich erkennbar ist die Position einer CP-simulierenden Stromquelle im Wasser.

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Das GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel konzipierte und entwickelte im Projekt ein optisches Kamerasystem mit strukturierter Beleuchtung zur hochauflösenden 3D-Vermessung des Meeresbodens. Trotz des Insolvenzausfalls des Beleuchtungs-partners FormLED konnte GEOMAR das System eigenständig fertigstellen und in Feldversuchen erfolgreich testen. Das Kamerasystem zeigte eine hohe Robustheit gegenüber Trübungen und Streulicht und bestätigte das Potenzial optischer Verfahren zur metrisch präzisen Unterwasservermessung.

Die Technologie wird aktuell weiterentwickelt und bildet die Grundlage für ein modulares optisches Inspektionssystem, das künftig in Verbindung mit AUVs und ROVs in Offshore-Inspektionen eingesetzt werden soll.

HafenCity Universität Hamburg

Die HafenCity Universität Hamburg (HCU) brachte ihre Expertise in der Sensordatenfusion, Navigationsalgorithmen und semantischen Umweltmodellierung ein. Gemeinsam mit Rosenxt wurden Inertial-messsysteme (IMUs) evaluiert und eigene Kalman-Filter-basierte Algorithmen entwickelt, die die Positionsbestimmung insbesondere bei dynamischen Bewegungen deutlich verbesserten. In Kooperation mit dem DFKI Osnabrück erarbeitete die HCU zudem eine semantische Umgebungsrepräsentation, um Messdaten automatisiert zu interpretieren und Objekte wie frei hängende Pipelineabschnitte oder Verbindungsstücke entlang des Inspektionspfades zu erkennen.

Innomar GmbH

Die Innomar GmbH (Rostock) entwickelte im Rahmen von CIAM einen hochempfindlichen Sub-Bottom-Profiler, der speziell für den Einsatz auf autonomen Unterwasserfahrzeugen konzipiert wurde.

Ziel war die Detektion von vergrabenen Pipelines und Sedimentstrukturen mit einer bislang nicht erreichten Auflösung. Trotz Engpässen in der Elektronikbeschaffung konnte ein Demonstrator realisiert und erprobt werden, der alle wesentlichen Zielparameter erfüllt. Die Ergebnisse belegen das Potenzial kompakter akustischer Systeme, die auf energiebeschränkten autonomen Fahrzeugen sowohl in Forschung als auch in industriellen Inspektionen eingesetzt werden können.

Die im Projekt entwickelten Komponenten konnten im Anschluss an das CIAM-Projekt in ein neues Produkt überführt werden, das vom Markt sehr positiv aufgenommen wurde. Weitere auf Ergebnissen des CIAM Projekts basierende Produkte sind für die nächsten 2 Jahre geplant.

baltic Fuel Cells GmbH

Die baltic Fuel Cells GmbH (Schwerin) arbeitete im Projekt an einem Energieversorgungskonzept auf Basis einer druckneutralen Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle. In enger Abstimmung mit Rosenxt

wurde ein Proof-of-Concept für die Integration in das 1000 m-AUV realisiert. Besonderes Augenmerk lag bei diesem Teil der Entwicklungstätigkeit auf einem hohen Wirkungsgrad, somit auf eine bestmögliche Ausnutzung der mitgeführten Gase Sauerstoff und Wasserstoff. Der eigens für dieses Projekt entwickelte Brennstoffzellen-Stack weist eine elektrische Effizienz von 59,8 % auf. Die erfolgreiche Integration in einen Druckkörper, welcher sich in das entwickelte AUV einfügen lässt, verdeutlicht die Vorteile der modularen Konzeption.

5. Feldtests und Validierung

Die im Rahmen des CIAM-Projekts entwickelten Systeme wurden in einer Reihe von Feldtests unter realen Umweltbedingungen erprobt, um die Funktionalität, Autonomie und Robustheit der AUV-Plattformen nachzuweisen. Diese Tests bildeten das Kernstück der Validierungsphase und dienten dazu, die im Labor erzielten Ergebnisse unter maritimen Einsatzbedingungen zu bestätigen.

Die Erprobung erfolgte in mehreren Phasen an unterschiedlichen Standorten in europäischen Küstengewässern, um ein breites Spektrum an Umweltbedingungen und Herausforderungen abzudecken:

- Helgoland: Erste Offshore-Demonstrationen zur Erprobung des autonomen Hafenstarts, der Missionsplanung, der Collision Avoidance und der Sensordatenerfassung unter realen Strömungs- und Sedimentbedingungen.
- Italienische Gewässer: Mehrere Testkampagnen im Sommer 2023 und Frühjahr 2024, mit Fokus auf Pipelineinspektionen und Navigationsrobustheit sowie Bereitstellung von Daten für die Arbeiten der Partner.
- Pipeline zwischen Mallorca und Ibiza: Einzelmission zur Validierung der autonomen Pipelineverfolgung in Gebieten mit komplexer Topographie.

- Schottische Westküste: Abschließende Erprobung im Herbst 2024 unter rauen hydrodynamischen Bedingungen zur Bewertung der Gesamtstabilität des Systems und der Einsatzfähigkeit in anspruchsvollen Offshore-Umgebungen.

Jede Testkampagne folgte einem abgestuften Validierungskonzept, von teilautonomen bis hin zu vollständig autonomen Missionen ohne Eingriffe durch das Begleitschiff.

Validierung der autonomen Missionsführung

Ein zentraler Fokus der Feldversuche lag auf der Demonstration der autonomen Missionsführung. Dabei konnten wesentliche Meilensteine erreicht werden:

- Das AUV startete selbstständig aus dem Hafenbecken, navigierte durch den Sicherheitskorridor und wechselte nach Freigabe in den autonomen Modus.
- Mittels kombinierter Sonar und optischer Sensorik identifizierte das AUV den Verlauf einer verlegten Pipeline im Testgebiet und verfolgte diese eigenständig über mehrere hundert Meter.
- In mehreren Versuchen gelang es dem Fahrzeug, bei temporärem Verschwinden der Pipeline im Sediment deren Verlauf zu extrapolieren, das Wiederauftreten der Leitung zu erkennen und den Inspektionspfad fortzusetzen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das System entscheidungsfähig, robust und adaptiv agiert, selbst bei wechselnden Umweltbedingungen und unvollständigen Sensordaten.

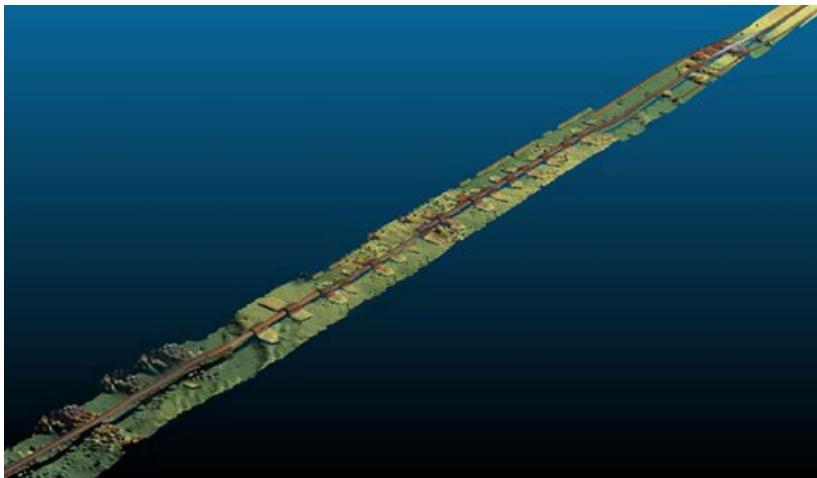


Abb. 6: Primäres Entwicklungsziel war die Realisierung von autonomen Unterwasserfahrzeugen zur Inspektion von Pipelines und Kabeln. Die Abbildung zeigt im Projekt erfasste Sonardaten einer industriell genutzten Pipeline

Sensorintegration und Datenauswertung

Während der Feldtests wurde die Integration unterschiedlicher Sensoren unter dynamischen Bedingungen validiert. Die Auswertung der Missionsdaten zeigte, dass die Fusion der Sensordaten zu einer signifikant verbesserten Objektlokalisierung führte. Durch die On-Board-Datenanalyse und die semantische Auswertung (entwickelt von DFKI und HCU) konnten die Systeme während der Mission bereits vorverarbeitete Ereignisinformationen erzeugen, die anschließend im automatisierten Reportingsystem zusammengeführt wurden. Dies reduziert den Datenumfang erheblich und erlaubt eine effizientere Nachbereitung im industriellen Umfeld.

Energieeffizienz und Dauerverhalten

Parallel zur Missionsvalidierung wurden auch Energie- und Ausdauerverhalten analysiert. Durch die Integration eines Antriebsystems mit besonders hohem Wirkungsgrad (71 %) und des energieoptimierten Softwarestacks konnten Einsatzzeiten von über 20 Stunden pro Mission realisiert werden.

Das im Projekt gemeinsam mit der balticFuelCells GmbH getestete Brennstoffzellen-System erreichte in Labortests eine stabile Leistungsabgabe über 48 Stunden. Die Kombination beider Systeme bildet eine mögliche Grundlage für zukünftige Langzeitmissionen.

6. Aktuelle Relevanz und Ausblick

Mit dem Projekt CIAM wurde in Deutschland eine technologische Basis geschaffen, die das Potenzial hat, die Inspektion und Überwachung maritimer Infrastrukturen grundlegend zu verändern. Die Ergebnisse besitzen sowohl wissenschaftliche, als auch strategische Bedeutung und fallen in eine Zeit, in der die Verwundbarkeit unterseeischer Energie- und Kommunikationssysteme zunehmend in den Mittelpunkt der öffentlichen Wahrnehmung rückt.

Die Zerstörung der Nord-Stream-Pipelines am 26. September 2022 hat deutlich gemacht, wie verletzlich die maritime Energieinfrastruktur ist. Diese Ereignisse führten zu einer Neuausrichtung des Interesses an Technologien für eine diskrete, kontinuierliche und kosteneffiziente Überwachung dieser Infrastrukturen.

Das im CIAM-Projekt entwickelte System erfüllt diese Anforderungen:

- Es arbeitet autonom und ohne Begleitschiff,
- kann Inspektionsmissionen selbstständig planen, durchführen und auswerten,
- lässt sich durch modulare Architektur an verschiedene Infrastrukturtypen und Wassertiefen anpassen.

Damit bietet CIAM eine konkrete technologische Antwort auf die aktuellen Herausforderungen der maritimen Sicherheit, Resilienz und Energieversorgung. Vollautonome AUVs dieser Art können

maritime Infrastruktur großflächig und kontinuierlich überwachen, ohne logistische Großaufwände oder sicherheitskritische Personalpräsenz.

Mit seinen Ergebnissen trägt CIAM dazu bei, den Standort Deutschland im Bereich der autonomen Unterwassertechnik zu stärken und die internationale Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Partner auszubauen. Besonders hervorzuheben ist, dass die Projektergebnisse nicht nur als Demonstratoren, sondern als technologische Plattformen mit klarer Transferperspektive entstanden sind.

Mit dem geplanten Serviceangebot von Rosenxt und der geplanten Ausgründung aus der Universitätsklinik Freiburg setzt CIAM Impulse für ein wachsendes Innovationsökosystem im Bereich der autonomen maritimen Systeme. In einer Zeit, in der maritime Sicherheit, Energieinfrastruktur und Nachhaltigkeit immer stärker zusammenhängen, liefert das Projekt damit einen konkreten und zukunftsgerichteten Beitrag zur maritimen Transformation Deutschlands.

Literatur

Bill, D., et. Al.: Electrochemical methods in the cloud: FreiStat, an IoT-enabled embedded potentiostat. *Anal. Chem.* 95, 13003–13009 (2023).

Campbell, P., et al.: Electric field gradient sensing for offshore cathodic protection surveying. *Proc. OCEANS 2023*, Biloxi, Mississippi (2023).

Coffelt, J.P., et al.: Behavior trees for adaptive multi-sensor perception in autonomous underwater robotics. *Proc. IEEE Underwater Technology* 2025, 1–8 (2025).

Coffelt, J.P., et al.: Sonar-aided visual odometry and reconstruction for autonomous underwater vehicles. *Proc. IEEE /RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS)* (2024).

Coffelt, J., et al.: Belief-based fault recovery for marine robotics. *Proc. JOWO* (2022).

Dahn, N., et al.: Autonomous docking between a mobile subsea docking station and an AUV while in motion. *Proc. OCEANS 2024-Halifax*, 1–9 (2024).

Doering, M., et al.: Advanced electrochemical potential monitoring for improved understanding of electrical neurostimulation protocols. *J. Neural Eng.* 20, (2023).

Jasper, M., et al.: Freiburgs Potentiostat (FreiStat) bringt elektrochemische Methoden für smarte elektrochemische und Biosensoren an die Edge. Proc. 16. Dresden Sensor-Symposium, Dresden (2022).

Kampmann, P., et al.: Multimodale Unterwasser-Sensorik für Umweltkartierung und Fahrzeugnavigation. In *KI-Technologie für Unterwasserroboter* (Springer Int. Publ., Cham, 2023), pp. 149 – 157.

Kampmann, P., et al.: A software architecture for resilient long-term autonomous missions of AUVs. Proc. IEEE / OES Autonomous Underwater Vehicles Symp. (2022).

Nauert, F. et al.: Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots. *Front. Robot. AI* 10, 1240276 (2023).

03SX550

UnLowDet

Laserinduzierte Unterwasser Low-Order-Detonation zur effizienten Entschärfung von Kampfmitteln im Meer

Autorenliste

LASER on demand GmbH

Dr.-Ing. Oliver Meier

Laser Zentrum Hannover e. V.

Jan Leschke, M. Sc.

Dr.-Ing. Benjamin Emde



1. Motivation

Die Vielzahl an alten Kampfmitteln im Meer stellt eine besondere Herausforderung für den Prozess der Kampfmittelbeseitigung dar. Aufgrund unvorhergesehener Detonationen und des aus dem Inneren des Kampfmittels austretenden Wirkmittels besteht durch alte Kampfmittel im Meer eine Gefährdung von Personen und Umwelt. Insbesondere die korrosive Wirkung des Wassers schwächt die Kampfmittelhülle und führt zu einem erhöhten Gefährdungspotential bei der Delaborierung des Kampfmittels.

Die Sprengung von Kampfmitteln führt durch die Wucht der Detonation, der entstehenden Schallwelle und austretende Wirkmittel zu enormen Folgen für die Umwelt. Nach derzeitigem Stand der Technik stellt eine Sprengung unter Wasser dennoch oftmals eine vertretbare Vorgehensweise dar. Die Auswirkung der Sprengung muss hierbei jedoch eingegrenzt werden. Zur Warnung von Tieren im Gefahrenbereich werden beispielsweise Vergrämungssprengungen eingesetzt. Die durch die Explosion entstehende Gasblase geht mit einer sich ausbreitenden Schockwelle einher, die Tiere erheblich beeinträchtigt kann. Die Größe der Gasblase ist dabei von dem Grad der Umsetzung („High-Order“ oder „Low-Order“) abhängig. Um dem entgegenzuwirken, werden Blasenschleier eingesetzt, deren Ausbringung jedoch sehr kosten- und zeitintensiv ist. Zudem kann der Blasenschleier durch Strömungen beeinträchtigt werden. Aus diesen Gründen sind neue Technologien zur Beseitigung von Kampfmitteln unbedingt erforderlich.

2. Vorarbeiten

Im Rahmen des Projektes DEFLAG „Sichere Deflagration von Blindgängern durch Lasertechnologie“ (FKZ: 13N14155) wurde gemeinsam vom Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH), der Laser on demand GmbH (LOD) und der Feuerwehr Hamburg / Kampfmittelräumdienst ein Verfahren zur laser-basierten Entschärfung von Kampfmitteln an Land entwickelt. Mit des Laserstrahls wird

die Stahlhülle des Kampfmittels eingekerbt und somit definiert geschwächt. Der Vorteil liegt darin, dass mittels einer definierten Schwächung der Kampfmittelhülle und dem anschließenden, gezielten Energieeintrag die gegenüber der Detonation wirkungs-mindere Deflagration (Low-Order-Detonation) ausgelöst werden kann. Dabei wird wie bei der konventionellen Entschärfung die Zündkette unterbrochen und lediglich ein geringer Teil der Spreng-stoffmenge mit Unterschallgeschwindigkeit umgesetzt.

Ein maßgebliches Kriterium der zu entwickelnden Prozessstrategie war es sicherzustellen, dass das Metall des Kampfmittelmantels im Kontaktbereich zum Sprengstoff an keiner Stelle eine vom Spreng-stoff abhängige kritische Temperatur überschreitet. Die Zündtempe-ratur von TNT liegt bei 240°C, während die Schmelztemperaturen der üblicherweise für Bombenhüllen verwendeten Stahlgusswerkstoffe über 1000°C liegen. Im Zuge der Prozessentwicklung wurde die Einhaltung der Temperaturobergrenze mit technischen Maßnahmen überwacht.

Die Ergebnisse der Abschluss-Demonstration des Projektes DEFLAG ist in Abbildung 1 dargestellt. In der Abbildung 1 ist links die entwi-ckelte Systemtechnik, bestehend aus dem Bearbeitungskopf sowie dem Achssystem zur Vorschubüberzeugung, zu sehen. Das Achssystem wird mit Hilfe von Magneten auf dem Kampfmittel positioniert. Zur Einsparung von Kosten wurde die gesamte Systemtechnik im 3D-Druckverfahren erstellt. Rechts ist eine Momentaufnahme der Low-Order-Detonation festgehalten.

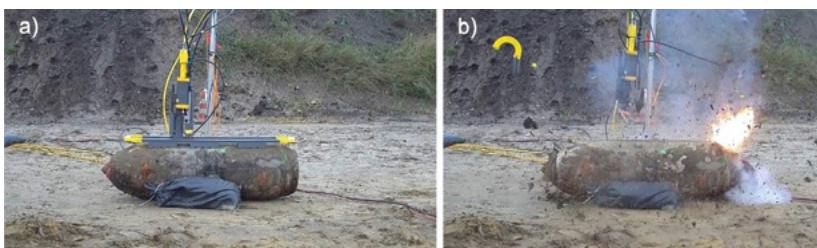


Abb. 1: Laserinduzierte Low-Order Detonation einer 500 Pfund Bombe an Land
(Quelle: LZH)

3. Zielstellung von UnLowDet

Im Forschungsprojekt UNLOWDET wurde ein Unterwasser-Laser-Verfahren entwickelt, mit dem Kampfmittel effizient unter Wasser entschärft werden können. Das Ziel war es, eine laserinduzierte Low-Order Detonation von Kampfmitteln unter Wasser auszulösen. Hierzu wurde im ersten Schritt mittels des Laserstrahls eine definierte Kerbe in das Kampfmittel eingebracht und somit eine Schwächung der Hülle erzeugt. Im zweiten Schritt wurde dann mit dem Laserstrahl eine Low-Order-Detonation ausgelöst, so dass der Zünder herausgelöst und die Zündkette unterbrochen wird. Das übergeordnete Ziel bestand darin, dass die Druckwelle im Vergleich zu einer normalen Detonation durch die Low-Order-Detonation erheblich reduziert wird. Dadurch wird ein erheblicher Sicherheitsbeitrag für die beteiligten Personen und die Umwelt geleistet. Falls es gelingt, die Grenzwerte für den emittierten Schall zu unterschreiten, könnte auf das zeit- und kostenintensive Ausbringen von Blasenschleieren verzichtet werden. Dadurch würde die Prozesskette des Entschärfens maßgeblich optimiert und effizienter gestaltet werden.

4. Ergebnisse

Die grundlegende Prozessentwicklung ist unter Einsatz statistischer Versuchsplanung in einem Wasserbecken am LZH erfolgt. Dafür wurde ein Bearbeitungskopf auf Basis von industriellen Standardkomponenten für den Unterwassereinsatz weiterentwickelt und mit koaxialer sowie offaxialer Gasdüse versehen. Als Schneidgase wurden Sauerstoff, Luft und Stickstoff untersucht, wobei die Wassertiefe im Versuchsbecken bei ca. 0,5 m lag.

Die Bereitstellung der für das Laserverfahren erforderlichen Systemtechnik erfolgt als mobile Containereinheit, in die Laserstrahlquelle, Kühler und Gasversorgung integriert sind. Eine Klimateinheit (insbes. Heizung) wird über eine netzunabhängige Stromversorgung betrieben, so dass unabhängig vom Anliegen einer äußeren

Stromversorgung oder vom Generator konstante klimatische Bedingungen für einen zuverlässigen Betrieb des Systems sichergestellt werden. Eine Überwachung mittels Telemetrie (über Mobilfunk) informiert den Anwender im Fehlerfall bzw. bei Überschreiten der definierten zulässigen Bedingungen.

Unterwasser-Achssysteme sind meist teuer und damit aufgrund der Beschädigungsgefahr für die vorliegende Aufgabe nur bedingt geeignet. Daher besteht in diesem Projekt der Ansatz der Verwendung von günstigen Standardkomponenten in Kombination mit 3D-gedruckten Spezialteilen für den Unterwassereinsatz – sowohl für den Aufbau des Achssystems als auch des Laser-Prozesskopfes. Dabei bestand insbesondere beim Optiksystem die größte Herausforderung im Schutz vor Kondensation und Eindringen von Wasser sowie dem Erhalt der Möglichkeit, Komponenten einfach tauschen zu können. Daher sind über den Projektverlauf sowohl für die Achse als auch die Optik insgesamt drei Versionen in mehreren Iterationsstufen entwickelt worden. Damit konnten die Demonstrationen in einem Wassertiefenbereich zwischen 1 und 10 m durchgeführt werden. Den Grundaufbau der Systemtechnik zeigt Abbildung 2.

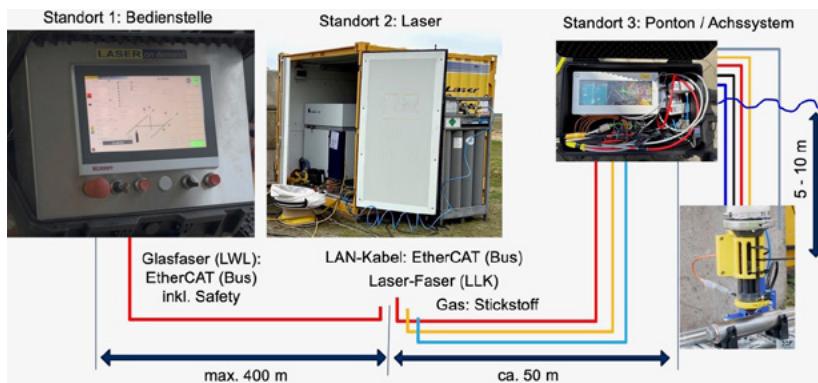


Abb. 2: Anlagentechnik, Signal- und Medienführung zur Unterwasser-Entschärfung
(Quelle: Laser on demand)

Sowohl die Unterwasserversuche an 200 g Probekörpern als auch die späteren Demonstrationen an realer Munition sind auf einem

Gelände der Wehrtechnischen Dienststelle 71 (WTD71) durchgeführt worden (siehe Abbildung 3). Für die Verfahrensentwicklung wurden zunächst 10 zylindrische Probekörper angefertigt und mit 200 g TNT gefüllt, deren Entschärfungsversuche überwiegend in einer Wassertiefe von max. 1 m in einem Durchfahrbecken stattfanden.

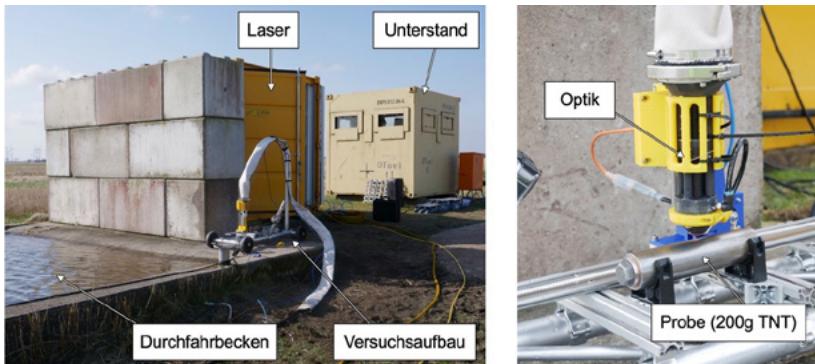


Abb. 3: Versuche zur Unterwasser-Entschärfung von Probekörpern mit 200 g TNT
(Quelle: LZH)

Der grundsätzliche Prozess teilt sich in zwei Schritte auf:

1. Erzeugen einer Kerbe zur Schwächung der Kampfmittelhülle
2. Laserinduzierte Zündung mit dem Ziel des Aufbrechens der Hülle

Basierend dem zuvor eingeholten Expertenwissen von den Kampfmittelräumdiensten wurde eine Restwandstärke von ca. 1/3 der Gesamtwandstärke angestrebt. Die Kerbe wird ferngesteuert im Rahmen einer ersten Überfahrt in die Hülle eingebracht. Im zweiten Schritt erfolgt dann die laserinduzierte Zündung mit angepassten Prozessparametern, die zu einer erhöhten Energieeinbringung durch den Laserstrahl führen. Bei einer erfolgreich ausgelösten Deflagration bricht die Hülle in zwei bis drei Teile. Abbildung 4 zeigt den signifikanten Unterschied des Deflagrations-Ergebnisses im Vergleich zu einer High-Order-Detonation eines identischen Probekörpers.



Abb. 4: Probekörper nach erfolgreicher Deflagration (links) und gesprengter Probekörper (rechts) (Quelle: LZH)

Die weiterführenden Untersuchungen in größerer Wassertiefe sowie die Demonstrationen an realen Kampfmitteln wurden in einem Sprengsee bei Wassertiefen von 5 – 10 m durchgeführt. Ein Ponton diente als Plattform zur Absenkung der Unterwasser-Systemtechnik inkl. des Kampfmittels. Einen Überblick über die Anordnung zeigt Abbildung 5.

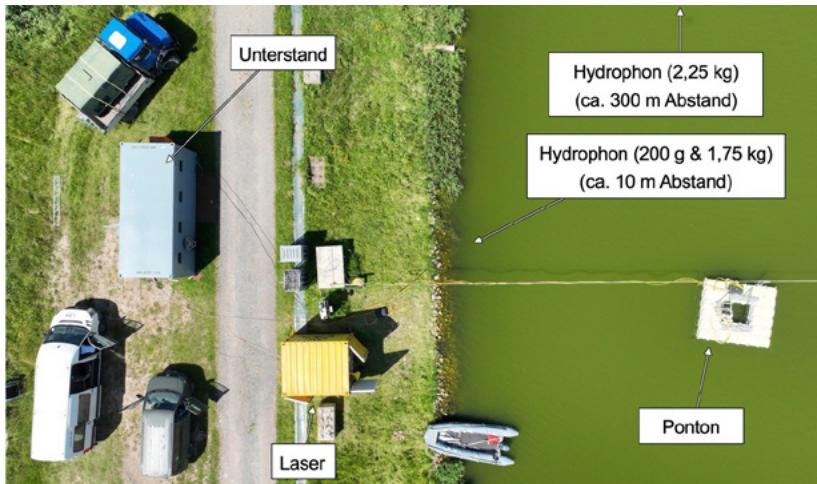


Abb. 5: Anordnung der Komponenten an der Unterwasser-Testanlage der WTD 71 (Quelle: LZH)

Die Demonstration des Verfahrens erfolgte sowohl an zwei 105 mm Granaten einer Feldhaubitze (Fundmunition) als auch an zwei 120 mm Mörsergranaten (Neumunition). Letztere hatte aus wissenschaftlicher Sicht den Vorteil, dass die Sprengstoffart und – menge bekannt waren – bei Fundmunition sind diese Informationen mit einer gewissen Unsicherheit belegt. Die technischen Daten sowie die Aufnahme im UnLowDet-System zeigt Abbildung 6.

Mörsergranate (3 Stk.)

- › Sprengstoff: 2,25 kg
- › Gesamtgewicht: ca. 26 kg
- › Wandstärke: ca. 12,4 mm
 - › 11,25 – 13,95 mm
- › Durchmesser: 120 mm
- › Bereitgestellt durch WTD71/BW



Abb. 6: Mörsergranate im UnLowDet-System inkl. technischer Daten (Quelle: LZH)

Zur Bearbeitung realer Kampfmittel, die i.d.R. eine ballistisch optimierte Form mit gewölbter Oberfläche aufweisen, wurde der Bearbeitungskopf mit zwei Abstandsrollen versehen. Durch das Eigen-Gewicht folgt die Optik, die in der Z-Achse beweglich gelagert ist, der Bauteilkontur und hält den Laserfokus im optimalen Bereich.

Der Kerbprozess, für den durch die Prozessentwicklung im Labor definierte Parametersätze vorlagen, konnte entsprechend den Erwartungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse des Zündprozesses hingegen, für den keine Vorabtests durchführbar waren, wiesen Schwankungen auf. So konnten von den vorhandenen 10 Probekörpern 6 erfolgreich per Laserstrahl deflagriert werden, bei 4 Proben war die Zündung allerdings nicht erfolgreich. Die Hülle blieb bei diesen Proben, abgesehen von der eingebrachten Kerbe, intakt.

Bei den Realkörpern konnte durch wiederholte Zündfahrten bei allen 4 Kampfmitteln eine Deflagration ausgelöst werden, die z. T. jedoch

lediglich zu einer Rissbildung in Verlängerung der zuvor eingebrachten Kerbe führte. Für ein erfolgreiches Aufklappen des Körpers mit Austreiben des Zünders ist offenbar ein definiertes Verhältnis aus Deflagrations-Intensität und mechanischer Stabilität des Munitionskörpers erforderlich.

Das Ergebnis einer wunschgemäßen Deflagration an einer Mörsergranate zeigt Abbildung 7.



Abb. 7: Ergebnis einer erfolgreichen laserinduzierten Deflagration an einer Mörsergranate
(Quelle: LZH)

Bei diesem Kampfmittel wurde nach einer ersten Kerb- und Zündfahrt, welche nicht zur Deflagration führte, der Munitionskörper um 180° rotiert und auf der gegenüberliegenden Seite der identische Verfahrensablauf durchgeführt. Im zweiten Durchgang erfolgte dann die Deflagration mit Aufbrechen des Körpers in zwei Halbschalen. Die große Menge an nicht umgesetztem TNT, die rechtwinkligen Bruchkanten sowie die Reste der Verstärkungsladungen zeigen eindeutig das Ergebnis eines Low-Order-Ereignisses.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens UnLowDet konnte damit erfolgreich nachgewiesen werden, dass das entwickelte laserbasierte Verfahren zur Entschärfung von Kampfmitteln unter Wasser geeignet ist. In keinem der durchgeführten Versuche und Demonstrationen kam es zu einer ungewollten High-Order-Detonation des Kampfmittels. Das Projektziel wurde damit erreicht.

Im Hinblick auf eine reproduzierbare Auslösung der laserinduzierten Zündung sind weitere Untersuchungen geplant, um das Verständnis der Wirkmechanismen zu vertiefen.

Danksagung

Das Vorhaben UnLowDet wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) unter dem Förderkennzeichen 03SX550 durch den Projektträger Jülich gefördert.

AMMOTRACe

Chemische Echtzeitdetektion von Altmunition im Meer: Ergebnisse, Systemik und Reifegrad des AMMOTRACe-Konsortiums

Autorenliste (im Namen des AMMOTRACe-Konsortiums)

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Dr. Björn Raupers
Prof. Dr. Eric Achterberg

Universität Rostock

Carolin Schwarz	Dr. Thorsten Streibel
Dr. Johannes Passig	Prof. Dr. Ralf Zimmermann
Thomas Kroeger Badge	

Photonion GmbH

Denis Starostin-Penner
Dr. Sven Ehlert
Dr. Andreas Walte

Innolas Laser GmbH

Dominic Kastner
Dorothée Niethammer
Christian Menhard

Leibniz-Institut für Ostseeforschung

Warnemünde (IOW)
Dr. Christian Gehm

Institute of Oceanology Polish Academy of Sciences (IOPAN)A
Bartłomiej Chlewicki

CTM S.A
Tomasz Bajer



1. Einleitung

Versenkte Altmunition ist in Nord- und Ostsee weit verbreitet und stellt ein langfristiges Umwelt-, Sicherheits- und Infrastrukturrisiko dar. [1-3] In dem Versenkungsgebiet Paardenmarkt (Nordsee, Belgien), eine Meile vor der belgischen Küste, sind ca. 35.000 t chemische Munition versenkt worden. Bei Bornholm und Gotland (Dänemark) sind zusammen ca. 40.000 t chemische Munition verklappt worden [4]. In der Kolberger Heide [1] vor Kiel liegen ca. 35.000 t konventionelle Munition größerer Kalibers. Häufig wurden Verkellungen im Geheimen entsorgt und die Munition bereits entlang des Weges zur Zieldeponie über Bord geworfen. Entsprechend ist die Dokumentation über diese Lagerstätte und Fundorte lückenhaft.

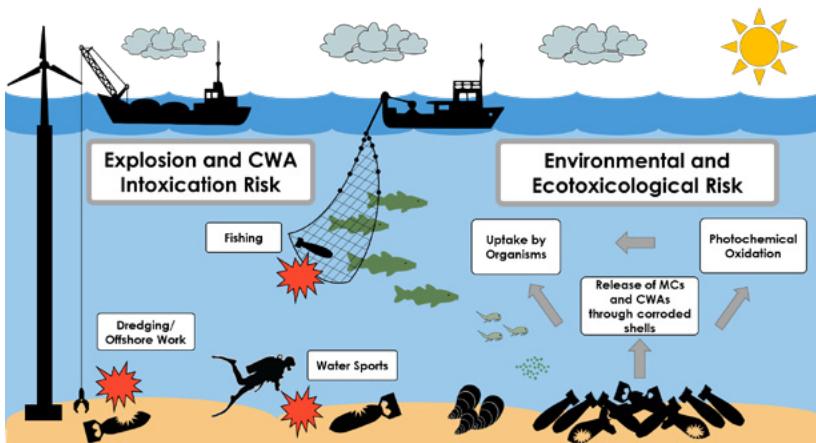


Abb. 1 Schematische Darstellung verkippter Munition und der von ihr ausgehenden Gefahren und Risiken

Geophysikalische Verfahren (Sonar, Magnetik, Sub-Bottom-Profilierung) lokalisieren Objekte zuverlässig, liefern jedoch keine Aussage über die tatsächliche Freisetzung von Schadstoffen in die Wassersäule und Sedimente. Klassische (laborgebundene) Analytik mittels diskreter Probenahme und LC / GC-MS ist hochsensitiv, aber zeit- und logistikintensiv und damit nur eingeschränkt für operative

Entscheidungen geeignet. [5-8] AMMOTRACe adressiert diese Lücke durch die Kombination aus selektiver Photoionisation (REMPI) und hochauflösender Flugzeitmassenspektrometrie (TOF-MS), die einen Echtzeit-Nachweis relevanter Munitionsverbindungen direkt im Feld ermöglicht – sowohl an Bord von Forschungsschiffen als auch in-situ auf ROVs bis etwa 100 m Tiefe. Das Konsortium bündelte dafür Laser-systementwicklung, Massenspektrometrie-Systemik, Membran-Ein-lassdesign, Unterwasser-Engineering sowie Analytik / Validierung. Neben der gezielten Detektion von TNT-Signaturen lag der Fokus auf der Erfassung von Stickoxidfragmenten (NO-Route) als robustem Indikatorpfad für Nitroaromaten, auf der Beherrschung matrixbe-dingter Störeinflüsse (Salz, organische Hintergrundsignale, Partikel) und auf der Sicherstellung von Betriebsstabilität unter realen Einsatz-bedingungen (Seegang, Vibrationen, Temperaturschwankungen). Pandemiebedingte Einschränkungen und Lieferengpässe bei opti-schen / elektronischen Komponenten erforderten Anpassungen im Ablauf, boten aber auch Gelegenheit für eine konsequente Härtung der Systeme gegenüber maritimer Beanspruchung und für die Ausarbeitung standardisierter SOPs.

2. Methodik und Systementwicklung

2.1 Gesamtarchitektur und Analytik-Konzept

Beide Plattformen folgen demselben analytischen Grundprinzip: Meerwasser → Membran → Gasphase → Laser-Photoionisation → TOF-MS-Detektion. Kernkomponenten sind ein durchstimmbarer OPO-Laser im UV-Bereich (inklusive Harmonischen-Erzeugung), eine REMPI-Ionisationsstrecke mit definiertem Strahl- / Probenü-berlapp, ein TOF-Analysator (Reflektor- oder Linear-TOF), digitale Hochspannungsversorgung, eine hochratentaugliche DAQ-Elek-tronik sowie ein Membraneinlass mit thermostatischer Führung der Wasser- / Gas-Phasen, beheizten Transferstrecken und optionaler Kühlfallen-Vorkonzentration. Zur Fernsteuerung wurden modulare GUIs, Diagnose- und Kalibrierroutinen sowie Fail-Safe-Interlocks implementiert (Wasser-, Vakuum-, Temperatur- und Türsensoren; Soft-Limits für Pumplasten und Laserbetrieb). Die Kalibrierstrategie

umfasst matrixangepasste Standards, interne Normalisierung, Leerwertkorrektur, Wiederfindungsprüfungen und Referenzierung gegen Gold-Standard-Methoden. Besondere Aufmerksamkeit galt der robusten Kopplung „Meerwasser → Membran → Gasphase“, da Salze, Biofilme und Partikel Membranen belasten und die Stoffübergangs-raten verändern können.

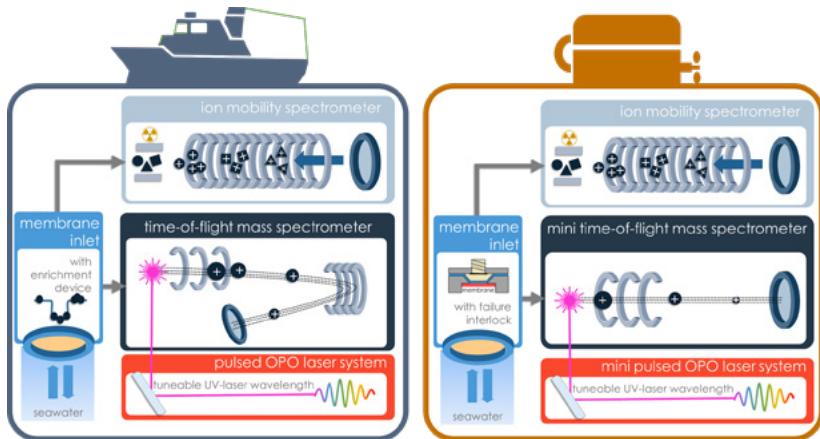


Abb. 2 Schematische Darstellung der zwei entwickelten PI-MS-Systeme: schiffsbasiert zur Echtzeitmessung und kompakt für den ROV-Einsatz bis 100 m Tiefe, sowie deren Applikation in weiteren Anwendungsszenarien

2.2 Schiffsbasiertes PIMS – Online-Messung an Deck

Das schiffsbasierte PIMS basiert auf einem Reflektor-TOF-MS, das für maritime Beanspruchung modernisiert wurde (Detektor, Vakuum, mechanische Entkopplung, digitale HV-Versorgung). Der Proben-eintrag erfolgt kontinuierlich über peristaltisch geförderte Wasser-ströme durch thermostasierte Membranmodule; je nach Matrix werden Spül- und Bypassmodi gefahren. Optional erlaubt eine Kühlfallen-Vorkonzentration die Bündelung flüchtiger/semiflüchtiger Analyten, um das Signal-Rausch-Verhältnis bei geringen Konzentra-tionen zu verbessern. Die REMPI-Laseroptik ist in die Ionenquelle integriert; das Bedienkonzept sieht vordefinierte Laserscan- und Messequenzen vor. Für die Routine wurden Steck- / Schnell-kupplungen, SOP-gestützte Membranwechsel und kurze Integra-

tionszeiten (≤ 1 h von Ankunft bis Messbereitschaft) etabliert. Die Kopplung an CTD-Rosetten und Oberflächenpumpen ermöglicht Tiefenprofile, die in Echtzeit bewertet werden können.



Abb. 3 Herbstausfahrt 2023 mit dem schiffbasierten Membraneinlass-OPO-PIMS-System auf der MS Littorina

2.3 ROV-integrierbares Unterwassersystem – druckfest und autark

Das Unterwassersystem ist ein kompaktes Linear-TOF-MS in einem druckfesten Gehäuse (≥ 100 m). Es integriert Laser, Optik, Membraneinlass, Vorpunkt, DAQ / PC, HV, Energiemanagement und Kühlung. Konstruktive Schwerpunkte waren Wärmeabfuhr (Kühlrippen, definierte Luftführung), Kondensationskontrolle (Sensorik, angepasste Betriebsmodi), Vibrations- / Schocktoleranz (Start- / Stopp-Sequenzen; geregelte Turbopumpenläufe), EMV-Entstörung sowie Servicezugänglichkeit (modularer Innenaufbau). Das System wurde für das GEOMAR-ROV PHOCA adaptiert (Mechanik, Strom / Telemetrie), inklusive motorisierter Justierspiegel zur Remote-Feinausrichtung des Strahlgangs. Ein Batterie-Subsystem erlaubt ca. zwei Stunden autarken Betrieb; Failsafe-Logik und Zustandsdiagnostik (BMS, Sensorfusion) sichern definierte Notabschaltungen.



Abb. 4 oben links: CAD-Zeichnung des Unterwassersystems im ROV Rahmen unten links: Erste Unterwassertests: Das System ist wasserdicht und bietet über 100 kg Auftrieb. Alle Systemtemperaturen bleiben innerhalb der definierten Grenzen. Lüfter sind für eine ausreichende Konvektion erforderlich. Die Tests zeigten eine erfolgreiche Funktion unter Wasser, jedoch trat nach längerer Zeit in kaltem Wasser Kondensation an den Wänden auf. Die Batterie hat eine Laufzeit von etwa zwei Stunden. Rechts: Integriert ins GEOMAR ROV PHOCA an Deck der ALKOR auf der Herbstausfahrt 2024

2.4 Entwicklung der Laserquelle – Spektrale Selektivität unter maritärer Last

Herzstück beider Plattformen ist ein Nd:YAG-gepumpter, durchstimmbarer OPO mit Varianten für Deck- und Unterwassereinsatz. Für das Decksystem priorisierten wir Leistungsreserve, Modenreinheit und schnelles Wellenlängenscanning im Zielbereich um 226 nm; für das Unterwassersystem standen minimiertes Bauvolumen, Verlustleistungsreduktion, Vibrations- und Temperaturstabilität im Vordergrund. Herausforderungen – etwa Strahlversatz durch Temperaturdrifts, Nichtlinearitäten in der Frequenzkonversion, refraktive Änderungen entlang der optischen Pfade – wurden über Kompensationsoptiken, thermische Entkopplung und adaptive Betriebsmodi adressiert. Im Ergebnis stehen spezifikationskonforme Pulseigenschaften und eine stabile Kopplung in die Ionenquelle, die selektive REMPI-Schemata für Nitroaromaten und perspektivisch auch für PAKs erlaubt.

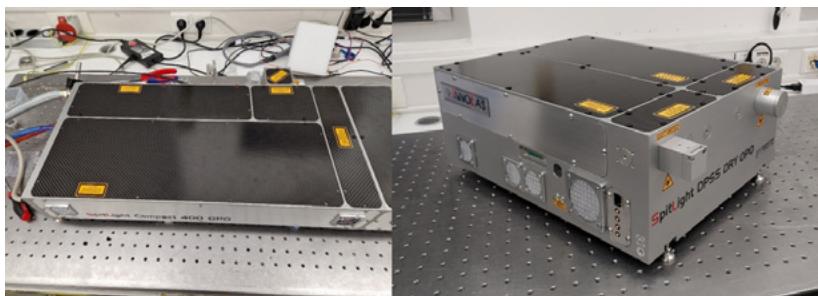


Abb. 5: Die fertiggestellten Lasersysteme. Links der Laser für das Schiffsbaserte System und rechts der miniaturisierte Laser für das Unterwassersystem.

2.5 Membran- und Einlassentwicklung

Die Auswahl des Membranmaterials beeinflusst Permeation, Selektivität und mechanische Stabilität gleichermaßen. [9-11] Wir testeten verschiedene Polymere und Dicken und entschieden uns schließlich für ein PDMS-basiertes Layout, das eine ausreichende Permeationsrate für Nitroaromaten bietet und gleichzeitig mechanisch robust gegenüber Druckdifferenzen (bis ~10 bar) bleibt. Ergänzend wurden Halteringe, Stützgitter und Oberflächenbehandlungen evaluiert, um die Langzeitstabilität im Seewasser zu erhöhen. Die Einlasshydraulik wurde auf minimales Blasenaufkommen ausgelegt; Spülslleifen und definierte Standby-Modi verhindern Membranfouling und tragen zur Reproduzierbarkeit der Übergangszeiten zwischen Mess- und Leerwert zustände bei. Für den Unterwassereinsatz wurden Dichtkonzepte (O-Ringe, Doppeldichtungen) und elektrische Durchführungen so ausgelegt, dass Wartungsintervalle verlängert und Servicezeiten an Deck minimiert werden.

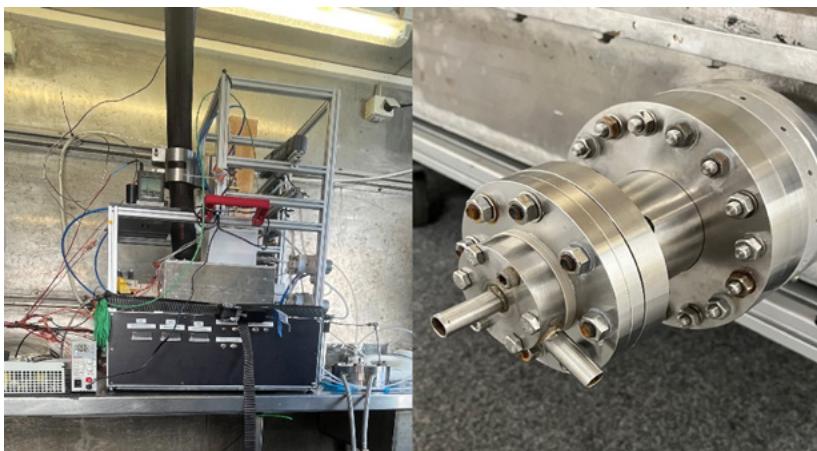


Abb. 6. Der fertiggestellte Membraneinlass (MI) des schiffsbasierten Systems (links) an Bord der Littorina im Juni 2024. Der MI wurde über eine große, schwarzummantelte Kapillare (oben im Bild) mit dem MS verbunden. Auf diese Weise konnten beide Geräte unabhängig voneinander betrieben werden und eine Kontamination mit überschüssigem Probenwasser wurde ausgeschlossen. Das rechte Foto zeigt den Membranhalter des MI des Unterwasser-MS. Die restlichen Komponenten befinden sich im Inneren des Unterwassergehäuses.

2.6 Steuerungssoftware und Datenhandling

Die Systemsoftware vereinheitlicht die Bedienung beider Plattformen: Start-/Stop-Sequenzen, Laser-/MS-Kontrolle, Membran- und Pumpensteuerung, Temperaturführung, Interlock-Logging und Datenerfassung. Ein modularer Ansatz ermöglicht das dynamische Laden von Messprofilen (z. B. Hotspot-Suche, Tiefenprofil, Validierungsmodus). Die Daten werden in einem redundanten Containerformat mit Metadaten (Positions- und Umweltdaten, SOP-Status, Versionsinformationen) aufgezeichnet. Für die Echtzeitbewertung erzeugt das System Qualitätsindikatoren (Q-Flags) und diagnostische Ereignisse (z. B. Vakuumgrenzen, Temperaturabweichungen, Laserdetuning).

3. Ergebnisse und Demonstrationen

3.1 Feldkampagnen und Prototyping-Lernen

Wir skalierten von kontrollierten Decktests hin zu mehrtägigen Schiffseinsätzen und schließlich zu ROV-Operationen. Dadurch konnten wir iterativ lernen: Membranmaterialien und -dicken wurden unter Praxisbedingungen verglichen; die Einlasshydraulik wurde auf geringes Blasenaufkommen und reproduzierbare Transitzeiten optimiert; thermische Fenster für Membran und Transferstrecken wurden mit Blick auf Signalstabilität festgelegt; REMPI-Parameter (Wellenlänge, Pulsennergie, Fokuslage) und MS-Timings (Ionenoptik, Extraktionsfelder) wurden auf maximalen Signalgewinn bei minimaler Fragmentation eingestellt. Gleichzeitig etablierten wir Service- und Fehlerprozeduren (Fouling-Management, Kondensatabführung), die die Einsatzfähigkeit im Feld sichern.

3.2 Schiffsbasierter System – TNT-Nachweis in Hotspots

Das schiffsbasierte PIMS erzielte reproduzierbare TNT-Signale in belasteten Wassermassen von Munitions hotspots (z. B. Kolberger Heide) bei leerwertstabilen Referenzen. Einsätze in Livorno und der Danziger Bucht adressierten niedrigere Konzentrationsbereiche und belegten die Methodenstabilität in komplexer Matrix. Die Kombination aus Membranheizung (~ 180 – 200 °C) und Kühlfallen-Vorkonzentration erwies sich als besonders vorteilhaft für den on-board Nachweis; angepasste Ionisationsschemata entlang der NO-Route ermöglichten zudem die Verfolgung charakteristischer Abbauprodukte (z. B. ADNT, DANT). Die Echtzeitvisualisierung der Signaltraces erleichterte die Probenstrategie (Hotspot-Annäherung, Tiefenprofile) und lieferte unmittelbar verwertbare Hinweise für weitere Probenahmen und Validierungen.

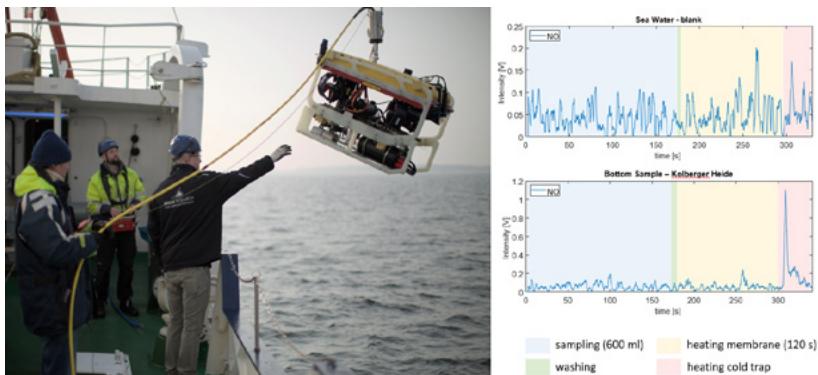


Abb. 7, links: Die Sediment-Sampler montiert unter einem Saab SEAEYE Falcon ROV des IOPAN für einen Feldtest in der Kieler Bucht. Rechts: Dargestellt sind Messungen mit dem schiffsbasierten AMMOTRACe Massenspektrometer. Oben eine Leerwertmessung aus einem nicht belasteten Gebiet in der Kieler Bucht und unten eine Messung aus dem am stärksten belasteten Gebiet in der Kieler Bucht. Das deutliche NO-Signal bei einer Zeit von 310 s ist klar im unteren Spektrum zu erkennen. Aufgrund des Membraneinlasses und der selektiven REMPI Ionisation muss es sich bei dem Signal um ein TNT-Signal handeln. Einstellungen: Membrantemperatur 190 °C, Probenvolumen 600 mL, Säule in der Kühlafalle GC HT5 ID 250 µm.

3.3 Unterwassersystem – Integration, Betrieb, Sensitivität

Das ROV-System wurde mechanisch, thermisch und elektronisch erfolgreich demonstriert (Dichtigkeit, Auftrieb >100 kg, temperaturstabile Betriebsfenster, zuverlässige Start-/Stopp-Sequenzen). Eine direkte in-situ TNT-Detektion im Wasser ist aktuell sensitivitätslimitiert. Die Ursachen liegen in der geringeren Laserleistung der Miniaturvariante, in den Grenzen der Ionenoptik durch die Miniaturisierung, sowie in einen konservativ ausgelegten Membranaufbau. Gleichwohl lieferte das System konsistente Spektren an Referenzpunkten, erlaubte schnelles Umschalten zwischen Mess- und Spülmodi und zeigte gute Betriebsstabilität über ca. zwei Stunden. Damit ist der Pfad für eine Absenkung der Nachweigrenzen klar definiert (dünnere / alternative Membranen, optimierte Ionenoptik, höhere optische Energiedichte, angepasste Detektionselektronik).

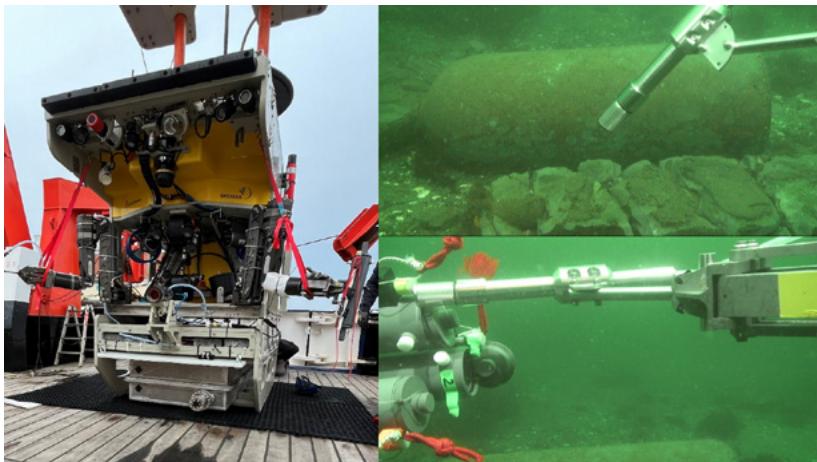


Abb. 8: Das Unterwasser-MS montiert unter das PHOCA ROV (links) an Bord der ALKOR bei Gerätetests im Oktober 2024. Das Probenwasser wird mittels einer kleinen Pumpe (Seabird 5T) durch einen Schlauch vom Greifarm des ROV (rechts, oben) angepumpt und zum Membraneinlass geleitet. Während jeder Messung wurden diskrete Referenzproben mittels Niskin-Flaschen (rechts, unten) für Vergleichsmessungen am GEOMAR genommen.

3.4 Erweiterte Zielklassen und Nebenergebnisse

Neben MCs zeigten REMPI-Signaturen Hinweise auf polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) mit typischen m/z -Abständen (14 Da). Diese Vorbefunde eröffnen attraktive Folgeanwendungen – vom Wrackmonitoring über Leckage-Screening an Offshore-Infrastrukturen bis hin zu komplementären Umweltfragestellungen im Küstenbereich. Perspektivisch kann die Plattform durch parametrisierte Laserschemata und zielklassenspezifische Datenprodukte erweitert werden.

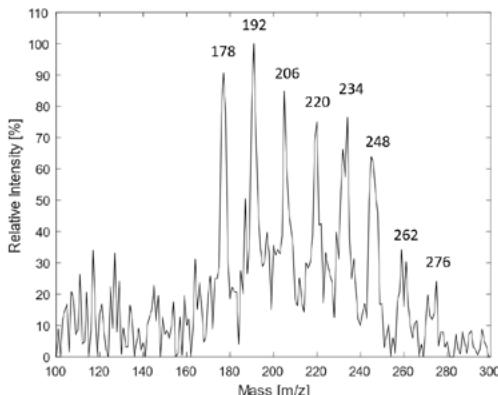


Abb. 9: Messungen von PAKs aus einer Meerwasserprobe der Kieler Bucht mit dem Unterwasser-MS. Aufgezeichnet im Oktober 2024. Der Massenbereich, der Abstand ($m/z = 14$ Da) der Signale und die Peak-Form weist auf eine polyzyklische aromatische Ringstruktur hin. Die Messungen wurden nicht kalibriert. Es handelt sich um vorläufige Tests. Das MS wurde nicht exakt auf die Messung von PAKs eingestellt.

3.5 Operations- / Logistikerkennnisse

Operativ konnten Rüst- und Integrationszeiten durch standardisierte Träger, vorkonfigurierte Kabelbäume und Checklisten deutlich reduziert werden. Lessons Learned betreffen u. a. geeignete Schmierstoffe an Unterwassersteckern (Vermeidung von Messinterferenzen), Vorfilter- / Spülstrategien gegen Verschmutzungs-Hotspots, Telemetriebandbreiten und On-board-Preprocessing sowie die Weiterentwicklung von Sicherheits- und Interlock-Strategien auf Basis von Wasser-, Druck- und Temperatursensorik. Diese Erfahrungen flossen in aktualisierte SOPs und in die Auslegung der nächsten Prototypschritte ein.

Tab. 1: Auswahl demonstrierter Szenarien und Erkenntnisse

Szenario	Plattform	Ziel	Kernergebnis	Implikation
Hotspot (Ostsee)	Schiffs-basiert	TNT/DANT on-board	Stabile Nachweise, leerwert-sicher	Routine-Screening möglich
In-situ Betrieb (ROV)	Unterwassersystem	Direct detection	Betrieb sicher, Sensitivität begrenzt	Roadmap LD-Absenkung
PAK-Exploration	Beide	Zusatzzielklassen	REMPI-Hinweise vorhanden	Erweiterte Nutzungs-pfade

3.6 Vergleich mit Referenzanalytik (Labor)

Die Validierung gegenüber Labor-Goldstandards erfolgte auf Basis diskreter Wasserproben, die zeitgleich zu den in-situ Messungen genommen wurden. Die Proben wurden konserviert, im Labor aufbereitet und mittels LC / GC-MS quantifiziert. Die Übereinstimmung der Hotspot-Ränge zwischen on-board Indikatoren (NO-Traces, REMPI-Signaturen) und Laborwerten war hoch; Abweichungen traten erwartungsgemäß bei stark variablen Strömungs- und Temperaturbedingungen auf. Diese Ergebnisse stützen die Eignung des schiffs-basierten Systems für Screening und operative Entscheidungen, während das Unterwassersystem primär als Technologiedemonstrator diente, dessen Sensitivitätsentwicklung klar definiert ist.

Sample	2,6-DANT		2,4-DANT		HMX		RDX		SDN		SD	
	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng
A01ROV01	30.7	3.0	8.5	0.2	0.040	0.003	0.58	0.02	0.57	0.02	0.19	
A02ROV02	40.7	4.8	10.9	0.2	0.012	0.001	0.23	0.01	8.0		2.7	
A02ROV03	30.2	3.0	14.4	0.3	1.32	0.11	85.7	2.8	46.9		16.0	

Sample	iDNB		iTNT		TNT		4-ADNT		2-ADNT		SD	
	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng	ng	± ng
A01ROV01	98.1	35.7	30.1	9.1	18.6	5.8	2.61	0.69	1.79		0.45	
A02ROV02	68.9	25.0	18.7	5.6	851	264	13.5	3.6	9.4		2.4	
A02ROV03	74.7	27.1	12.6	3.8	1596	495	31.1	8.2	33.9		8.5	

Abb. 10 Ergebnisse der Referenzmessungen am GEOMAR zu den Wasserproben in der Nähe der untersuchten Sprengkörper.

4. Technologischer Reifegrad und Transferpotenzial

Beide AMMOTRACe-Plattformen (Schiff & ROV) wurden unter realen Bedingungen auf See erprobt – damit erreichen sie TRL 7 (Technology Readiness Level): ein funktionsfähiger Prototyp, der in der Zielumgebung arbeitet. Der nächste Schritt, TRL 8, bedeutet Einsatzreife im Routinebetrieb. Um dorthin zu kommen, konzentrieren wir uns auf vier gut verständliche Verbesserungsfelder:

▪ Empfindlichkeit & Spezifität

Wir wollen noch kleinere Konzentrationen sicher erkennen – und zwar gezielt die „richtigen“ Moleküle. Dazu helfen u. a. dünnere / robustere Membranen, eine strömungsgünstige Probenführung und besser fokussierte Laser-Ionisationsschemata.

Ergebnis: mehr Signal bei weniger Rauschen.

▪ Energie & Wärme

Auf dem Schiff ist Strom kein Thema – unter Wasser schon. Durch lastadaptiven Betrieb (Laser / Pumpen), kluges Wärmemanagement und optional Hybridversorgung (ROV-Power + Akku) verlängern wir die Einsatzzeit und erhöhen die Betriebssicherheit.

▪ Automatisierung & Qualitätssicherung

Auto-Kalibration, Driftkorrektur, Selbstdiagnose der Sensoren und geführte SOPs (Standard Operating Procedures) machen

die Systeme alltagstauglich. Das verringert Bedienfehler, spart Zeit und liefert konsistent verlässliche Daten – auch bei wechselnden Umweltbedingungen.

- **Anbindung & Prozesse**

Standardisierte Anschlüsse (Mechanik/Elektrik/Telemetrie) und datenprodukt-fertige Ausgaben (Zeitreihen mit Qualitätsflags, Ereignisprotokolle) sorgen dafür, dass EOD-Teams (Explosive Ordnance Disposal), Behörden und Forschende die Ergebnisse direkt weiterverwenden können – inkl. Einbindung in Risikomodelle und Munitionskataster.

4.1 Standardisierung und Verwertung

Die Kommerzialisierung der AMMOTRACe-Technologie läuft, während Standardisierung und Datenformate bewusst parallel mit den ersten Einsätzen entwickelt werden. Ziel ist es, den Schritt vom Demonstrator zur verlässlichen, anschlussfähigen Lösung zu vollziehen – ohne die Dynamik des Markteintritts zu verlieren.

Im Bereich Standardisierung erarbeiten wir gemeinsam mit Anwenderinnen und Anwendern (EOD-Teams, Behörden, Forschung) praxistaugliche SOPs für Messung, Wartung und Sicherheit sowie QA/QC-Bausteine (u. a. Leerwert-/Spülfolgen, Kalibrationsroutinen, Drift-Checks). Parallel definieren wir Daten- und Metadatenschemata, die Positions-, Umwelt- und Zustandsinformationen (z. B. Q-Flags, Ereignisprotokolle) eindeutig abbilden und als CSV/JSON sowie über dokumentierte Schnittstellen ausspielbar sind. Warn-/Alarmschwellen und Berichtslayouts werden im Dialog mit den Bedarfsträgern so festgelegt, dass Ergebnisse unmittelbar in Lagebilder, Risikomodelle und Entscheidungsprozesse einfließen. Diese Standardisierung versteht sich als lebendes System mit versierten Spezifikationen und Rückwärtskompatibilität, damit frühe Nutzerinvestitionen geschützt bleiben.

Die Verwertung folgt einem anwendungsnahen Mix aus Systemvertrieb und Dienstleistungsangeboten:

- Systeme (schiffsbasiert und ROV-integrierbar) werden mit Inbetriebnahme, Schulung und abgestuften Service- / Wartungsverträgen angeboten – inklusive Kalibrier-Kits, Remote-Support und planbaren Ersatzteilpaketen.
- Flankierend bauen wir Measurement-as-a-Service (MaaS) auf: Messkampagnen „schlüsselfertig“ – von Mobilisierung und maritimer Operation (in Kooperation mit Partnern mit Offshore- / ROV-Erfahrung) über Datenanalyse bis zum qualitätsgekennzeichneten Datenprodukt (Zeitreihen, Kartenlayer, Berichte). Dieses Modell senkt Einstiegshürden, erlaubt Pilotierungen und schafft belastbare Referenzen für den späteren Systemkauf.
- Ergänzend planen wir Demonstrations- und Referenzkampagnen mit Behörden und industriellen Akteuren, um Anwendungsfälle (Hotspots, Trassen, Wrackumfelder) zu validieren und die Standardisierungsschritte unmittelbar am Bedarf auszurichten.

Eine Lizenzierung der Kerntechnologie steht aktuell nicht im Fokus. Der stärkste Hebel liegt in operativem Nutzen: verlässliche Messungen, eindeutig interpretierbare Daten und ein Support-Ökosystem, das Offshore-Realitäten berücksichtigt. Mit der laufenden Kommerzialisierung und der schrittweisen Normierung von SOPs und Datenformaten wird die Grundlage geschaffen, die Technologie breit und vergleichbar einzusetzen – als System beim Anwender oder als Service im Verbund mit maritimen Partnern.

4.2 Grenzen der aktuellen Generation und nächste Schritte

Die größte Herausforderung unserer Unterwasserplattform ist weiterhin die Empfindlichkeit: In realen Einsätzen liegen die Konzentrationen häufig so niedrig, dass sie bei begrenztem Strom-, Platz- und Kühlbudget nur schwer direkt in-situ messbar sind. Hinzu kommen maritime Belastungen wie Strömung, Vibrationen, Temperaturschwankungen und Biofouling (Anlagerungen), die Einlass- und Messstabilität über Zeit beeinflussen. Auch die

Wartungsintervalle wollen wir verlängern, damit Systeme länger ohne Servicefenster auskommen.

Unsere nächsten Schritte zielen deshalb auf drei Ebenen:

Erstens verbessern wir die Probe-zu-Signal-Kette – von der Membran (Material, Dicke, Oberflächenbehandlung) über die Gasführung bis zur Ionenerzeugung und -führung im Massenspektrometer. Ziel ist mehr Signal bei weniger Rauschen, ohne die Robustheit zu kompromittieren. Zweitens optimieren wir Energie- und Wärmemanagement: intelligenter Betriebsmodi für Laser und Pumpen, effizientere Kühlung im geschlossenen Druckkörper und, wo sinnvoll, hybride Versorgungen aus ROV-Strom und Akku. Drittens erhöhen wir den Automatisierungsgrad: ereignisgesteuerte Messprofile (z. B. bei Strömungswechsel), Auto-Kalibration, Driftkorrektur und Selbstdiagnosen sollen verlässliche Daten mit weniger Bedienaufwand liefern.

Parallel verknüpfen wir die Chemie stärker mit dem geophysikalischen Lagebild: Messdaten aus Sonar / Magnetik und unsere Echtzeitindikatoren fließen in gemeinsame Kartenebenen, damit Einsatzteams schneller entscheiden können („Wo messen? Was tun?“).

In geplanten Demonstrationskampagnen mit Behörden, EOD-Teams und Offshore-Partnern schärfen wir diese Arbeitsabläufe und erzeugen belastbare Referenzen – sowohl für Measurement-as-a-Service als auch für den Systembetrieb beim Anwender. Mit diesen Schritten wollen wir die Nachweisgrenzen weiter senken, die Einsatzdauer verlängern und den Übergang zur Einsatzreife (TRL 8) fundiert erreichen.

5. Fazit

AMMOTRACe zeigt, dass chemische Echtzeitdetektion mariner Munitionsfreisetzungen auf Deck unter Routinebedingungen möglich ist und dass eine ROV-integrierte Massenspektrometrie im maritimen Feld betriebsstabil realisierbar ist. Das schiffsbasierte System

liefert verlässliche on-board Nachweise in Hotspots und unterstützt die zielgerichtete Probenahme sowie die operative Entscheidungsfindung. Das Unterwassersystem bildet mit klaren Optimierungspfaden die Grundlage für direkte in-situ Nachweisfähigkeit. Die selektive Laser-Photoionisation erweitert das analytische Fenster (MCs / PAK) und ist in komplexen Matrices vorteilhaft. Die enge Zusammenarbeit über Disziplin- und Sektorengrenzen hinweg (Forschung, Industrie, Betreiber) war entscheidend, um die Technologie auf TRL 6/7 zu heben und den Transferpfad zu skizzieren. Damit leistet das Konsortium einen substantiellen Beitrag zur maritimen Sicherheit und Umweltüberwachung in Europa.

Danksagung

Gefördert im Rahmen MarTERA (ERA-NET Cofund); deutscher Förderanteil u. a. durch das BMBF. Wir danken den Crews der beteiligten Forschungsschiffe / ROVs sowie den industriellen und akademischen Partnern für ihren wesentlichen Beitrag zu Entwicklung, Integration und Feldtests.

Literatur

- [1] Beck, A. J., Gledhill, M., Schlosser, C., Stamer, B., Böttcher, C., Sternheim, J., Greinert, J., and Achterberg, E. P. 2018. *Front. Mar. Sci.* 5, 2416. DOI:10.3389/fmars.2018.00141.
- [2] Missiaen, T. and Henriet, J. P. 2002. Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs, Brussel.
- [3] Böttcher, Knobloch, Rühl, Sternheim, Wichert, and Wöhler (Stand 2011). BSH.
- [4] Bełdowski, J., Klusek, Z. et al. 2016. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 128, 85 – 95. DOI:10.1016/j.dsr2.2015.01.017.
- [5] Klusek, Z. and Grabowski, M. 2018. In Towards the Monitoring of Dumped Munitions Threat (MODUM), J. Bełdowski, R. Been and E. K. Turmus, Eds. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer Netherlands, Dordrecht, 49 – 70. DOI:10.1007/978-94-024-1153-9_3.
- [6] K. Wolf. 2017. OFFSHORE WIND INDUSTRY 3 (2017), 32 – 33.
- [7] Kampmeier, M., van der Lee, E. et al. 2020. *Continental Shelf Research* 198, 104108. DOI:10.1016/j.csr.2020.104108.
- [8] Sayle, S., Windeyer, T., et al. 2009. *Mar technol soc j* 43, 4, 41 – 51. DOI:10.4031/MTSJ.43.4.10.
- [9] Ketola, R. A., Short, R. T., and Bell, R. J. 2012. In Comprehensive Sampling and Sample Preparation, 497 – 533. DOI:10.1016/B978-0-12-381373-2.00152-6.
- [10] Davey, N. G., Krogh, E. T., and Gill, C. G. 2011. *TrAC, Trends Anal. Chem.* 30, 9, 1477 – 1485.
- [11] Krogh, E. T. and Gill, C. G. 2014. *J. Mass Spectrom.* 49, 12, 1205–1213. DOI:10.1002/jms.3447.

OCUMAR

Automatisierter und teilautonomer Schiffsbetrieb in beengten Seegebieten mit nicht-kooperativen Teilnehmern

Autorenliste

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Sönke Bartels

Pia-Lucia Jonitz

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Meurer

Anschütz GmbH

Daniel Sommerstedt

Malte Hölscher

Lars Rüter



1. Einführung, Motivation und Ziele

Die zahlreichen Berichte der letzten Jahre der Bundesstelle für Seeunfälle (BSU) über Kollisionen von Schiffen bestärken das Engagement in der Entwicklung automatisierter Kollisionsvermeidungsstrategien, um die oftmals ausgelastete Brückenbesatzung bei ihrer Arbeit zu unterstützen und fehlende Aufmerksamkeit mit innovativer Technik frühzeitig zu kompensieren. Speziell bedingt die Auslastung der Fahrwasser vor den deutschen Küsten mit einer Vielzahl von Teilnehmern und statischen Seengebietsbegrenzungen durch Wassertiefe, Gefahrenstellen und Verkehrstrennungsgebieten eine umfassende situative Aufmerksamkeit des nautischen Personals. Eine zusätzliche Herausforderung sind nicht-kooperative Teilnehmer, die nur über Radar und Nahfeldsensorik auf einer interaktiven Seekarte sichtbar gemacht werden können.

OCUMAR verfolgte das Ziel, neue Methoden, Konzepte und Lösungen für den automatisierten bzw. teilautonomen Schiffsbetrieb in begrenzten Seengebieten mit nicht-kooperativen Teilnehmern zu entwickeln.

Speziell sollte eine übergreifende integrierte Navigationslösung für die automatisierte und die teilautonome Schiffsführung durch die geeignete informationstechnische Kopplung von Sensor-, Navigations- und Antriebssystemen im Autopiloten entwickelt werden, um Kollisionssituationen automatisiert unter Berücksichtigung der geltenden Kollisionsverhütungsregeln (KVR) auflösen zu können. Dies umfasste

- die automatisiert sowie teilautonom kollisionsvermeidende Manöverausführung unter Berücksichtigung von Abschnitt II (Verhalten von Fahrzeugen, die einander in Sicht haben) der KVR (Regeln 11 bis 18),
- die sensorbasierte, vom Gesamtlagebild abhängige Pfad- und Trajektorienplanung und deren regelungstechnische Umsetzung in einer automatisierten Schiffsregelung,

- verschiedene Erprobungen / Demonstrationen der umgesetzten Lösungen durch Versuchsträger gestützte Betrachtung realistischer Szenarien, basierend auf relevanten Manöver- und Verkehrssituationen, Auswertungen von Schiffsunfalluntersuchungen der BSU und
- ein zulassungsfähiges Navigationssystem, welches von Nautikern akzeptiert wird.

Im Vorhaben wurden die Regeln 7 (Möglichkeit der Gefahr eines Zusammenstoßes), 8 (Manöver zur Vermeidung von Zusammenstößen), 11 (Anwendung), 12 (Segelfahrzeuge), 13 (Überholen), 14 (Entgegengesetzte Kurse), 15 (Kreuzende Kurse), 16 (Maßnahmen des Ausweichpflichtigen), 17 (Maßnahmen des Kurshalters) und 18 (Verantwortlichkeiten der Fahrzeuge untereinander) umgesetzt. Die ECDIS wurde als ergänzende Wissensquelle verwendet, insbesondere für stationäre Objekte wie Seezeichen und Tonnen, Flachwasserbereiche und No-Go-Areas.

Ausgewählte Projektergebnisse

Entwicklung von Verkehrsszenarien

Als Grundlage für die Einschätzung der Leistungsfähigkeit des zu entwickelnden Systems wurden Szenarien in verschiedenen Seegebieten entwickelt. Jedes dieser Szenarien stellt eine typische Verkehrssituation dar, in der das vom System gesteuerte „Eigenschiff“ die Situation erfolgreich zu bewältigen hat. Ob eine Situation erfolgreich bewältigt wurde, wird anhand der für jedes einzelne Szenario festgelegten Erwartungen überprüft.

Die Entwicklung der Szenarien basiert auf drei Ansätzen. Der erste Ansatz beruht auf der Entwicklung typischer Verkehrssituationen, die unmittelbar aus den Kollisionsverhütungsregeln ableitbar sind. Hierzu zählen beispielsweise kreuzende Kurse, Überholsituationen sowie Situationen des Entgegenkommens. Diese sind jedoch auf zwei Fahrzeuge beschränkt. Der zweite Ansatz setzt hier an:

Auf Grundlage der Erfahrungen erfahrener Nautiker entstanden weitere, drei oder mehr Schiffe betreffende, komplexere Szenarien. Im dritten Ansatz wurden Seeunfallberichte verschiedener Flaggenstaaten analysiert und einige davon ausgewählt.

Zu jedem Szenario wurden mögliche sinnvolle Lösungswege vorgeschlagen. Lösungswege sind in diesem Kontext dann als sinnvoll zu verstehen, wenn sie von erfahrenen Nautikerinnen und Nautikern entsprechend der bestehenden Rechtslage der Kollisionsverhütungsregeln (KVR) auch so gefahren würden. In Bezug auf das Verhalten (teil-)autonomer Systeme ist diese Annahme tragfähig, solange nichtautonome Systeme am Seeverkehr teilnehmen und diese von anderen Verkehrsteilnehmenden ein gemäß den Regeln und der guten Seemannschaft korrektes Verhalten erwarten.

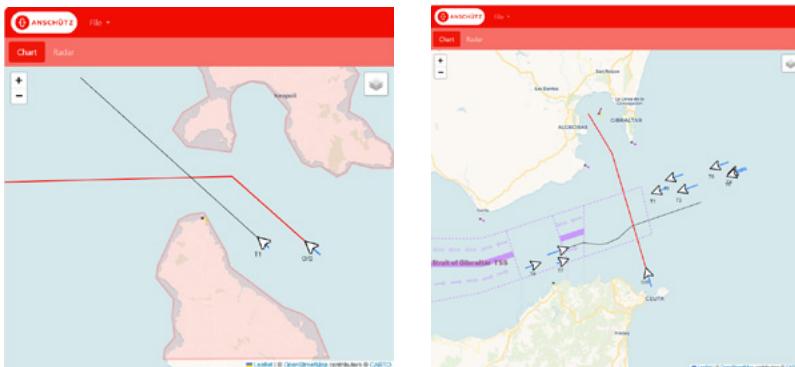


Abb. 1, links: Szenario „Überholen in beengten Gewässern“.

Abb. 2, rechts: Szenario „Kreuzen von sehr viel Verkehr“.

Ein maschinenlesbares, auf JSON basiertes Dateiformat wurde definiert, um den Austausch und die Reproduzierbarkeit der Szenarien zu gewährleisten. Die Erstellung der Szenarien erfolgt so nutzerfreundlich auf einer Karte im Browser und ermöglicht auch Laien das Erstellen eigener Szenarien.

Fachliche Validierung der Verkehrsszenarien

Um die fachliche Richtigkeit zu validieren, wurden die insgesamt 29 Szenarien in mehreren Expertenrunden, bestehend aus erfahrenen Lotsen und Nautikern, vorgestellt und diskutiert. Der Fokus lag einerseits darauf zu prüfen, dass die Szenarien nautisch sinnvolle und relevante Situation beschreiben, andererseits auf der Diskussion, ob die von den entwickelten Algorithmen erzeugten Lösungen für einen erfahrenen Nautiker nachvollziehbar und erwartbar sind. Das hier erhaltene Feedback wurde in die finale Version der Szenarien eingearbeitet.

KVR-Analyse und Bewertung der Verkehrssituation

Parallel zur Definition der Szenarien entstand ein komplexes, deterministisches Modell zur Bewertung von Verkehrssituationen nach den wichtigsten Regeln der Kollisionsverhütungsregeln. Hier wurden neben einschlägiger Literatur auch die Erfahrungen aus den Diskussionen über die Erwartungshaltung von Nautikern zur Lösung der Szenarien mit einbezogen. Dieses Modell erlaubt mithilfe einiger vom Nutzer wählbaren Parameter eine anwendungsfreundliche Konfiguration und durch die deterministische Natur nachvollziehbare und reproduzierbare Entscheidungen über die Beurteilung der Verkehrssituation. Das resultierende KVR-Analyse-Modul wurde als Grundlage für die Situationsbewertung aller Konsortialpartner verwendet und mit den definierten Szenarien verifiziert. Von ausgewählten Szenarien wurde zudem eine Verifizierung mit den Systemtestanlagen von Anschütz erfolgreich durchgeführt.

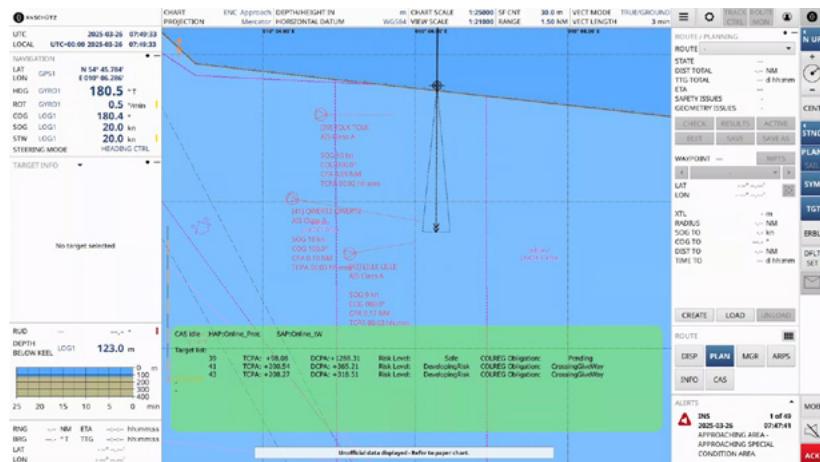


Abb. 3: KVR-Analyse mittels Systemtestanlagen von Anschütz.

Schiffsmodelle für die Pfad- und Manöverplanung

Die Berücksichtigung der Dynamik des Eigenschiffes in Verbindung mit der Dynamik weiterer, zur Lösung der Aufgabenstellung relevanter Teilnehmer in einem Seegebiet bedingt, dass hinreichend genaue mathematische Modelle zur Beschreibung der Schiffs-dynamiken (Eigen- und Fremdschiffe) zur Verfügung stehen. Gleichzeitig muss die Komplexität der Schiffsmodelle im Hinblick auf deren Parametrierbarkeit und die echtzeitnahe Lösung der Pfad- und Trajektorienplanung möglichst gering sein. Dazu wurden sowohl Pfadfolge-Modelle als auch komplexe Manöver-Modelle mit mehreren Freiheitsgraden untersucht. Letztere zeichnen sich zwar durch eine präzisere Abbildung der Schiffs-dynamik aus, erfordern aber gleichzeitig die Identifikation einer Vielzahl von Parametern. Pfadfolge-Modelle hingegen eignen sich nur in einem beschränkteren Dynamikbereich, sind aber durch wenige Parameter zu beschreiben, welche in der Praxis deutlich einfacherer durch geeignete Manöver online identifiziert werden können. Im Pfadfolgebetrieb bilden diese Modelle den Dynamikbereich des Schiffes zudem mit hinreichender Genauigkeit ab. Als digitaler Zwilling eignen sich die Modelle außerdem zur sicheren und kostengünstigen Evaluation der methodischen Entwicklungen. Hierzu wurde eine Simulationsumgebung mit Ergebnis-Visualisierung realisiert.

Zur Abbildung unterschiedlicher Dynamiken wurden Modellparameter der DIN/IEC 62065 genutzt, welche verschiedene Schiffstypen (schnelle Fähre, Containerschiff, Tanker) beschrieben. Ergänzend wurden hybride Modellierungsansätze unter Einbezug Gaußscher Regressionsansätze verfolgt und im Rahmen einer Pfadfolgeregelung im Vergleich mit physikalischen Modellen evaluiert [2].

Pfadplanung und modellbasierte Trajektorienplanung

Anhand des ausgewählten Modells, welches die Schiffs dynamik abbildet, kann systematisch ein geometrischer Pfad für das Schiff geplant werden, welcher (bezogen auf das gewählte Modell) von diesem fahrbar ist. Dabei bezeichnet die Pfadplanung zunächst die Aufgabe, eine Route für das Schiff zu finden, welche kollisionsfrei im Bezug auf statische Hindernisse ist. Dieser Pfad ist inhärent frei von zeitlicher Information. Statische Hindernisse stellen im Zusammenhang mit der zeitlichen Länge des Manövers eine Herausforderung dar, da sie in der Umgebung des Schiffes in hoher Anzahl vorliegen können. In der Literatur werden meist Algorithmen verwendet, welche auf der Beschreibung von Hindernissen mittels konvexer Polygone basieren, wie z. B. der Algorithmus von Gilbert-Johnson-Keerthi (GJK). Diese Einschränkung der äußeren Form resultiert in einer mathematisch kompakten Darstellung und Berechenbarkeit von Kollisionen. Der GJK-Algorithmus berechnet, ob sich zwei konvexe Polygone überschneiden und kann somit eine Kollision erkennen. Hierbei beschreibt ein Polygon die geometrische Form des Eigenschiffs und eines die Geometrie des statischen Hindernisses.

Die dynamischen Eigenschaften des Schiffs stellen eine zentrale Einschränkung im Rahmen der Pfadplanung dar. Aufgrund der besonderen Dynamik, die durch komplexe Wechselwirkungen zwischen dem Schiff und dem umgebenden Wasser entsteht, ist sicher zu stellen, dass die geplanten Trajektorien unter realen Bedingungen tatsächlich fahrbar sind. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, die Dynamik des Schiffes über die gesamte Dauer des Manövers hinweg mit hinreichender Genauigkeit in den Planungsprozess zu integrieren. Der zu befahrende Pfad wird dabei

als kontinuierliche, zeitlich parametrierte Trajektorie geometrischer Punkte im Raum beschrieben, die sich auch an einer Sequenz von Referenz-Wegpunkten orientieren kann.

KVR-konformer Trajektorienplaner

Um die Pfadplanung und die KVR-Analyse in einen KVR-konformen Trajektorienplaner zu integrieren, wird ein Rapidly-Exploring- Random-Tree (RRT) Algorithmus verwendet. Dieser basiert auf einem iterativen, zufallsbasierten Abtasten des Zustandsraums. Da dieser Algorithmus nicht modellbasiert ist und somit nicht die spezifische Dynamik der Schiffe abbildet, wird der RRT mit sogenannten Bewegungsprimitive verknüpft. Bewegungsprimitive sind ein Verfahren aus dem Bereich der Robotik, welches komplexe Bewegungen in simplere Teilbewegungen unterteilt und somit das unendlich-dimensionale Planungsproblem in ein Sequenzierungsproblem umwandelt. Angewendet auf maritime Fahrzeuge wird eine Manöverdatenbank erstellt, die die möglichen Bewegungsabläufe eines Schiffes mit einer hinreichenden Genauigkeit modelliert. Da Schiffe im Vergleich zu mobilen Robotern über eine geringere Anzahl an Freiheitsgraden verfügen, lassen sich Manöver primär durch den Winkel des Kurswechsels charakterisieren. Zur systematischen Berechnung der Bewegungsprimitive wird das zugrunde liegende Optimalsteuerungsproblem

$$\min_{x,\delta} \int_{t_0}^{t_e} \frac{1}{2} \dot{x}^2 dt$$

mit dem mathematischen Schiffsmodell

$$\dot{x} = f(x, \delta), \quad t > t_0, \quad x(0) = x_0, \quad x(t_e) = x_e$$

unter Berücksichtigung geeigneter Randbedingungen $\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$ für den Ruderwinkel δ formuliert. Die so generierte Datenbank, bestehend aus Kurswechselmanövern über verschiedene Zeithorizonte bei konstanter Geschwindigkeit, bildet die Grundlage für den entwickelten Algorithmus [1]. Ein Beispiel zeigt Abb. 4.

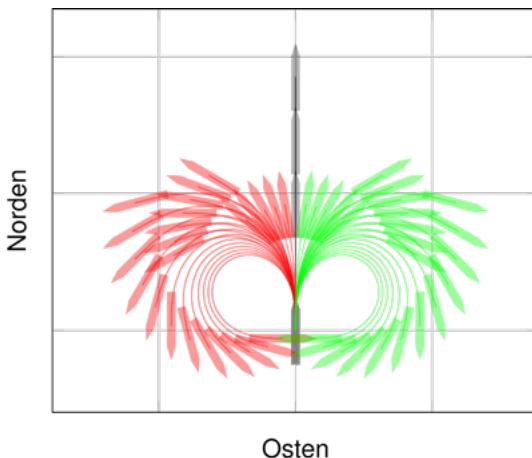


Abb. 4: Beispiel einer Manöverdatenbank bestehend aus Bewegungsprimitiven.

Die Bewegungsprimitive tragen nicht nur zur Berücksichtigung der Systemdynamik bei, sondern erleichtern auch die Kollisionsdetektion mit statischen Hindernissen. Dies liegt darin begründet, dass anstelle der Prüfung der kontinuierlichen Trajektorie bzw. einzelner Diskretisierungszeitpunkte, eine konvexe Abschätzung des gesamten Manövers vorgenommen werden kann. Dies ermöglicht, dass nur eine einzige Iteration des genannten GJK-Algorithmus durchgeführt werden muss.

Befinden sich weitere Verkehrsteilnehmer im Seegebiet, erweitert sich der Planungsprozess um die zeitliche Komponente. Die Planung des eigenen Wegverlaufs hängt nun maßgeblich davon ab, wann und wo sich andere Verkehrsteilnehmer befinden. Diese beeinflussen direkt den Pfadverlauf des Eigenschiffs.

Erfordert die Situation eine Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmer, erfolgt diese nicht frei, sondern gemäß den KVR. Diese schriftlich formulierten Regelwerke wurden mathematisch abgebildet und entsprechend in die Pfadplanung integriert. Die Regeln für Schiffe, welche sich in Sichtweite zueinander befinden sind in Abb. 5 schematisch dargestellt.

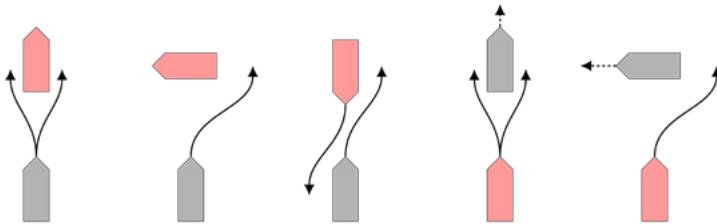


Abb. 5: Graphische Illustration der KVR 13-17 (von links nach rechts).

Um die KVR anhand eines regelbasierten Ablaufs berücksichtigen zu können, wird das zuvor beschriebene KVR-Analyse-Modul genutzt. Diese Situationsbewertung wird gemeinsam mit dem beschriebenen RRT-Algorithmus, den erzeugten Bewegungsprimitiven und dem Konzept der sogenannten Velocity-Obstacles verknüpft, um kollisionsfreie KVR-konforme Trajektorien für das Eigenschiff zu generieren. Dies ermöglicht eine realistische vorausschauende Kollisionsvermeidung. Velocity-Obstacles basieren auf der Darstellung von Eigenschiff und statischen sowie dynamischen Hindernissen im Geschwindigkeitsraum, was eine effiziente Bewertung von kollisionsrelevanten Konfigurationen und zugleich deren Vermeidung ermöglicht. Eine Gesamtdarstellung dieses Ansatzes kann [1] entnommen werden.

Evaluation und Verifikation der entwickelten Pfad- und Trajektorienplanungskonzepte

Die Evaluation der Pfad- und Trajektorienplanungskonzepte wird beispielhaft an einer Menge von Wegpunkten in einem beengten Seegebiet der Kieler Förde durchgeführt (vgl. Abb. 6). Der entwickelte Algorithmus soll dabei sicherstellen, dass der erzeugte Pfad bzw. die generierte Trajektorie den gegebenen Wegpunkten folgt.

Es zeigt sich, dass Pfadfolgeaufgaben erfolgreich und numerisch effizient bewältigt werden können. Der Pfad bleibt zu jedem Zeitpunkt mit dem Modell konform. Für die Planung des dargestellten Manövers werden 2 s benötigt, wobei eine Strecke von 44 km zurückgelegt wird. Dieses Ergebnis ist auf den Einsatz der Bewegungsprimitive zurückzuführen. Kürzere lokale Trajektorien können

entsprechend den gestellten Anforderungen in Echtzeit berechnet werden. Es wird deutlich, dass die Rechendauer nicht von der Modellgenauigkeit und -güte abhängt, sondern lediglich von der Anzahl der benötigten Manöver bis zum Erreichen des Zielpunkts.

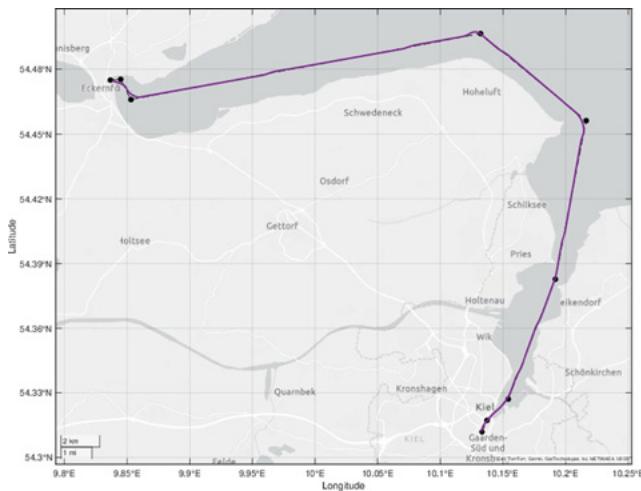


Abb. 6: Darstellung des berechneten Pfads anhand einer Menge von vorgegebenen Wegpunkten.

Eine Evaluation des entwickelten KVR-konformen Trajektorienplaners [1] zeigt Abb. 7. Hierbei erfolgt eine Auflösung der KVR-Situation für Szenarien, welche die Regeln 13 (Überholen), 14 (Entgegengesetzte Kurse) und 15 (Kreuzende Kurse) adressieren. Die Bezeichner „Ownship“ und „Target“ verweisen dabei jeweils auf Eigen- und Fremdschiff. Die Ergebnisse bestätigen die Eignung und Leistungsfähigkeit der entwickelten Methodik, welche zudem auf Szenarien mit Mehrkontakteinsituationen skaliert.

Optimale und modellprädiktive Regelung

Die erzeugten Trajektorien können sowohl als präzise Referenztrajektorien als auch im Rahmen einer Vorsteuerung für das Schiff genutzt werden. Für den praktischen Einsatz ist jedoch eine Integration in einen geschlossenen Regelkreis durch die gezielte Rückführung von Messdaten, wie z. B. GPS, erforderlich, um den Trajek-

torienfolgefehler zu minimieren. Neben klassischen Ansätzen auf Basis von Proportional-Integral-Reglern eignen sich insbesondere modellprädiktive Ansätze, da diese mit den vollständig geplanten Zustandstrajektorien kompatibel sind. Hierzu wurde eine nicht-lineare MPC (NMPC) entwickelt, welche durch die Lösung eines entsprechenden Optimalsteuerungsproblems auf einem wandernden Horizont die notwendige Stellgröße erzeugt, um der generierten Trajektorie zu folgen. Aufgrund der Notwendigkeit, den vollständigen Modellzustand zyklisch der MPC für die Prädiktion zuzuführen, wird der Regelkreis um einen geeigneten Zustandsschätzer erweitert, welcher beispielsweise das zur MPC duale Konzept der Moving-Horizon-Estimation (MHE) integriert.

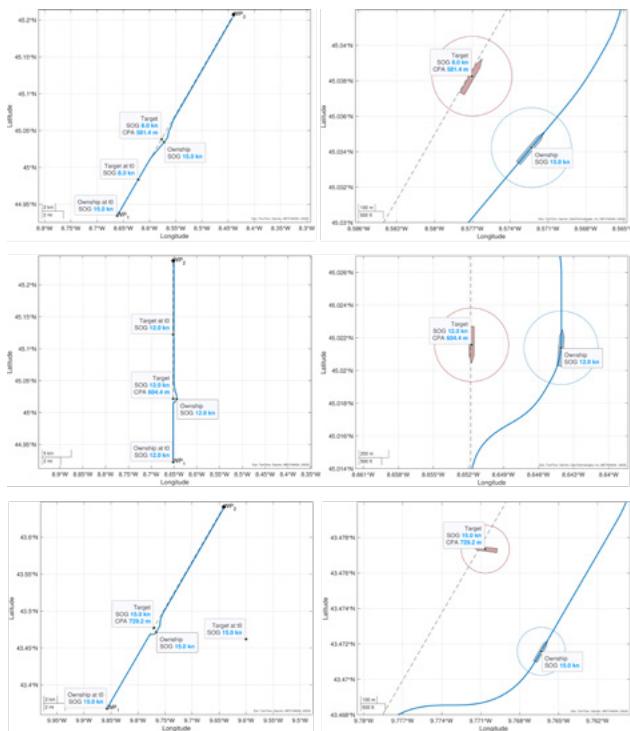


Abb. 7: Beispiele für die Anwendung des KVR-konformen Trajektorienplaners. Die Szenarien adressieren Regeln 13 (oben), 14 (Mitte) und 15 (unten). Die rechte Spalte zeigt jeweils einen vergrößerten Ausschnitt des linken Bilds.

Gesamtintegration und Validierung

Für die Entwicklung der Software wird ein eigenes MATLAB-Frame-work konzipiert.

Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Integration in Simu-link sowie auf der Fähigkeit zur automatisierten Codegenerierung. Durch diesen strategischen Ansatz kann die Software auf unter-schiedlichen Zielplattformen ausgeführt werden. In diesem Fall konkret auf Simulink und dem Robot Operating System (ROS2). Somit werden sowohl Mikrocontroller als auch Industrie-PCs adressiert.

Für die experimentelle Validierung der entwickelten Algorithmen wurde von Seiten des Verbundpartners KIT ein unbemannter Versuchsträger (USV) mit 4 Meter Länge (siehe Abb. 8) realisiert.



Abb. 8: Experimenteller Versuchsträger (Aufnahme 10/2025 während Umbau).

Des Weiteren wurden im Rahmen des Forschungsprojekts OCUMAR insgesamt sechs umfangreiche Testfahrten mit dem Versuchsträger MS WaveLab durchgeführt. Die WaveLab ist ein 21 Meter langes Forschungsschiff für autonome Schifffahrt, das im Projekt CAPTN Förde Areal durch das Bundesministerium für Verkehr gefördert wurde. Die Erprobungen fanden im digitalen Testfeld Kieler Förde statt – einem hochkomplexen maritimen Verkehrsgebiet mit einer Vielzahl unterschiedlichster Verkehrsteilnehmer, darunter Sport-boote, Fähren, Container- und Kreuzfahrtschiffe.



Abb. 9: Forschungsschiff MS WaveLab.

Während der Testfahrten konnten über 150 verschiedene Kollisionssituationen effizient erfasst und gemäß den Kollisionsverhütungsregeln (KVR) bewertet werden. Die Kieler Förde unterliegt darüber hinaus weiteren Regelwerken wie der Seeschifffahrtsstraßenordnung und den Kieler Hafenverordnungen, die im Rahmen der OCUMAR-Erprobungen jedoch nicht berücksichtigt wurden.

Die Erfassung und Verfolgung der Verkehrsteilnehmer erfolgte über Radar- und AIS-Daten. Dabei wurden sowohl Einzelziel- als auch Mehrzielsituationen analysiert. Die Tests lieferten aussagekräftige Ergebnisse zur Bewertung automatisierter Manöver. Besonders wertvoll waren die direkten Rückmeldungen erfahrener Nautiker, die während der Erprobungen auf dem Wasser eingebunden waren. Diese trugen wesentlich zur Qualität der Validierung bei und führten zu einer Optimierung der Verfahren sowie einer erhöhten Akzeptanz der entwickelten Lösungen.



Abb. 10: Erprobung mit der MS WaveLab auf der Kieler Förde.

Ein zentraler Aspekt war die Parametrisierung sicherheitsrelevanter Größen, insbesondere der Sicherheitsabstände, die in enger Abstimmung mit Nautikern festgelegt wurden. Diese Parameter hängen maßgeblich von den Eigenschaften des Eigenschiffs, den spezifischen Gegebenheiten des Seegebiets, dem Verkehrsaufkommen sowie dem Einsatzzweck und dem individuellen Sicherheitsbedürfnis der Schiffsleitung ab.

Ein bemerkenswerter Befund war das Verhalten vieler Sportboote, die sich gegenüber der WaveLab eher defensiv und nicht strikt regelkonform gemäß KVR verhielten. Dies unterstreicht die Relevanz robuster Sensorik und intelligenter Entscheidungslogik für die sichere Navigation in gemischten Verkehrsgebieten mit kooperativen und nicht-kooperativen Teilnehmern.

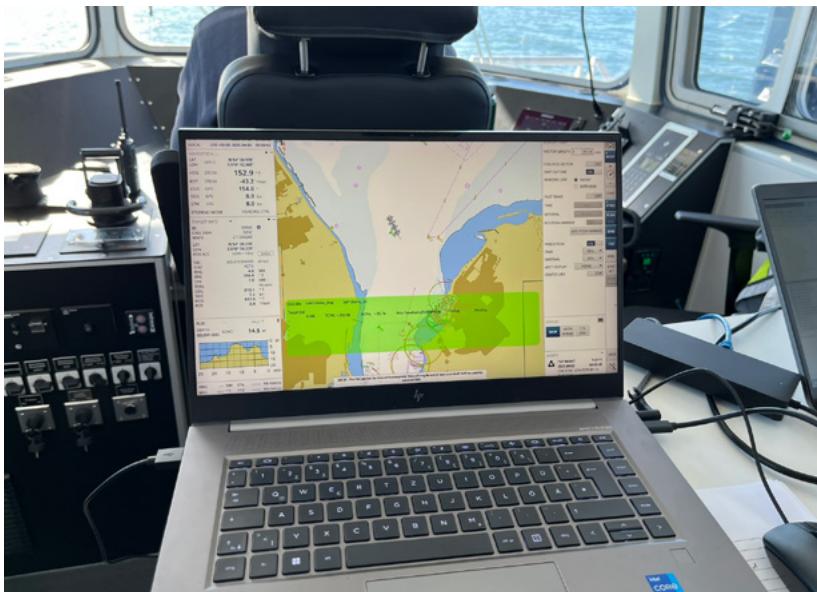


Abb. 11: KVR-Analyse mit der MS WaveLab auf der Kieler Förde.

Zusammenfassung

Das Projekt OCUMAR hat das Ziel verfolgt, durch innovative Konzepte für zunehmend hochautomatisierte und zudem teil-autonome Wasserfahrzeug die Sicherheit in der Schifffahrt zu erhöhen, den veränderten Mobilitäts- und Logistikanforderungen gerecht zu werden, und den zunehmenden Fachkräftemangel zu adressieren. Besondere Herausforderungen für die Automatisierung, Navigation und Schiffsführung stellen dabei speziell beengte Seegebiete dar, welche aufgrund des komplexen und hochdynamischen Lagebilds mit oftmals Mehrkontakte situationen neue Verfahren zur echtzeitfähigen Online-Bahnplanung, Schiffsregelung mit entsprechendem KVR-konformen Autonomielevel erfordern.

OCUMAR widmete sich diesen Fragestellungen durch die Entwicklung neuer Regelungstechnischer Methoden, Konzepte und Lösungen für den hochautomatisierten bzw. (teil-)autonomen

Schiffsbetrieb, deren algorithmischer Umsetzung und experimenteller Evaluation. Dies umfasste sowohl die Erzeugung digitaler Zwillinge durch die Modellierung der Schiffsphysik als auch die darauf aufbauende KVR-konforme Pfad- und Trajektorienplanung sowie deren Integration eine modellprädiktive Schiffsführung. In Verbindung mit einem entwickelten KVR-Analyse-Modul werden kritische Situationen erkannt und adäquate Ausweichtrajektorien berechnet. Diese zeichnen sich durch ein natürliches Fahrverhalten aus, was gerade im Bezug auf die Interaktionen mit nicht-automatisierten Fahrzeugen von Vorteil ist. Gleichzeitig sind die Trajektorien energieeffizient und fordern nur dann Eingriffe, wenn es erforderlich ist.

Die durchgeführten Tests unter verschiedenen Bedingungen im realen Umfeld der Kieler Förde – geprägt durch eine hohe Vielfalt an Verkehrsteilnehmern mit individuellem Verhalten – haben gezeigt, dass die entwickelten Verfahren durchgehend zuverlässig, effektiv und gut parametrisierbar sind. Die Bewertungen und Handlungsempfehlungen stimmten mit den Einschätzungen der anwesenden nautischen Experten überein und waren für diese nachvollziehbar. Die Qualität der Situationsbewertung und der Trajektorienberechnung hängt maßgeblich von der Güte der Lagebilderstellung und den eingesetzten Eingangssensoren ab.

Die Ergebnisse zeigen ein sehr hohes Potenzial für:

- die Erhöhung des Autonomiegrads,
- die Entlastung bzw. Einsparung von Personal,
- ein verbessertes Situationsbewusstsein,
- eine erhöhte Sicherheit,
- sowie die Zulassungsfähigkeit der Systeme.

Da es sich um ein regelbasiertes Verfahren handelt, kann dieses sowohl gegenüber Zertifizierungsstellen wie Klassifikationsgesellschaften als auch gegenüber den Zulassungsbehörden der Flaggenstaaten einfach vorgestellt, erklärt und nachgewiesen werden. Die Präsentation der Projektergebnisse gegenüber potenziellen Anwendern wurde hinsichtlich Inhalt, Ergebnis und Nachvollziehbarkeit sehr positiv aufgenommen.

Ausblick

Für den weiteren Fortschritt der automatisierten Kollisionsvermeidung ist eine deutlich verbesserte Lagebilderstellung in befahrenen Gewässern unerlässlich. Insbesondere bei der Integration kommender optischer Sensoren zur Detektion muss gewährleistet sein, dass relevante nautische Parameter für jedes Schiff zuverlässig erkannt werden. Neben den bisher berücksichtigten KVR-Regeln 11 – 18 sind weitere Bereiche der Kollisionsverhütungsregeln von Bedeutung, wie Regel 9 (Enge Fahrwasser), Regel 10 (Verkehrstrennungsgebiete) sowie die Vorschriften zum Verhalten bei verminderter Sicht. In Deutschland kommen ergänzende Regelwerke wie die Seeschiffahrtstraßenordnung und lokale Hafenverordnungen hinzu, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

Für eine Skalierung und breite Anwendung der entwickelten Verfahren ist eine einfache Anpassung schiffstyp- und seegebietsspezifischer Parameter erforderlich. Darüber hinaus existieren weitere Kollisionsvermeidungsstrategien, wie Geschwindigkeitsreduktion, Beschleunigung oder Aufstoppen, die bislang nicht berücksichtigt wurden und in zukünftigen Arbeiten integriert werden sollten.

Weitere Herausforderungen ergeben sich aus Situationen mit mehreren Verkehrsteilnehmern, deren Auflösungen aktuell nicht explizit in den KVR beschrieben sind, weshalb hier die Integration von nautischem Wissen in die Regelungstechnischen Konzepte notwendig ist. Dies gilt zudem für die notwendige Prädiktion des

Kurses der zur Auflösung einer Situation relevanten Teilnehmer (Target-Prediction), welche einen signifikanten Einfluss auf die erzeugten Lösungstrajektorien hat. Hierbei können u. a. Konzepte des maschinellen Lernens von Nutzen sein, welche dabei Ein- und Mehrkontaktsituationen erfassen müssen. Die gewonnenen Ergebnisse sind zudem im Hinblick auf die Entwicklung vollständig autonomer Systeme von höchster Relevanz, da hier die Missionsplanung und -umsetzung maßgeblich die selbstständige Auflösung von Kontaktsituationen mit sämtlichen Verkehrsteilnehmern in einem Seegebiet bedingt.

Die weitere Erforschung dieser Aspekte und die Integration der daraus resultierenden Ergebnisse in die bisher entwickelten Modelle, Module und Systeme wird maßgeblich dazu beitragen, die Sicherheit und Effizienz des automatisierten Schiffsbetriebs weiter zu erhöhen und die Zulassungsfähigkeit der Systeme zu stärken.

Literatur

- [1] S. Bartels und T. Meurer, „COLREG compliant trajectory planning for autonomous vessels in areas with static and dynamic obstacles“, in 2025 European Control Conference (ECC), 2025, S. 1767 – 1772. doi: 10.23919/ECC65951.2025.11186934.
- [2] S. Bartels und T. Meurer, „Gaussian Process Regression for System Identification of Autonomous Surface Vessels“, in 16th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS), 2025, Angenommen.
- [3] S. Helling und T. Meurer, „Dual Collision Detection in Model Predictive Control Including Culling Techniques“, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Bd. 31, Nr. 6, S. 2449 – 2464, Nov. 2023, doi: 10.1109/TCST.2023.3259822.

SMATRA

**Verbesserte Bewertung der Schwingfestigkeit
geschweißter maritimer Tragstrukturen unter
Anwendung lokaler Nachweiskonzepte**

Autorenliste

**Technische Universität Hamburg,
Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen**

Dr.-Ing. habil. Moritz Braun
M.Sc. Sascha Maurice Isay
M.Sc. Shi Song
M.Sc. Jan-Hendrik Grimm

**Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und
Systemzuverlässigkeit LBF**

M.Sc. Niklas Michael Bauer
Dr.-Ing. Jörg Baumgartner

Ramboll Deutschland GmbH

M.Sc. Leon Wilms
Dr.-Ing. Dennis Birkner
Dr.-Ing. Karsten Schürmann
Dr.-Ing. Marc Voßbeck



1. Einleitung

Die Bewertung der Schwingfestigkeit geschweißter maritimer Tragstrukturen (GMT) ist eine zentrale Herausforderung bei der Auslegung moderner Offshore-Bauwerke wie Fundamenten für Offshore-Windenergieanlagen, Plattformen oder Navigationshilfen. Diese Strukturen sind über lange Zeiträume extremen, komplexen und zyklischen Belastungen durch Wind, Wellen, Betriebsvibrationen und kombinierte Umwelteinflüsse ausgesetzt. Aufgrund ihrer sicherheitsrelevanten Funktion ist ein zuverlässiger Ermüdungsnachweis unabdingbar. Gleichzeitig steigt der Bedarf an wirtschaftlicher Optimierung der Auslegung.

Bisher genutzte Schwingfestigkeitskonzepte, insbesondere das Nennspannungskonzept und das Strukturspannungskonzept, zeichnen sich zwar durch einfache Anwendbarkeit und gute empirische Absicherung aus, stoßen jedoch bei modernen Konstruktionsdetails, dicken Blechen und nichtproportionalen Belastungssituationen an ihre Grenzen. Sie ermöglichen oft keine ausreichende Berücksichtigung lokaler Effekte wie Nahtgeometrie, Nachbehandlungen oder variable Amplituden. Die Folge sind konservative Auslegungen mit teilweise überdimensionierten Schweißverbindungen, die wirtschaftlich nachteilig sind.



Abb. 1: Fest verankerte geschweißte maritime Tragstrukturen im maritimen Bereich
©Ramboll

Demgegenüber bieten lokale Nachweiskonzepte, wie das Kerbspannungskonzept, ein deutlich höheres Potenzial zur realitätsnahen Abbildung der tatsächlichen Beanspruchungsverhältnisse. In Branchen wie dem Automobilbau sind diese Konzepte bereits etabliert. In der maritimen Branche fehlt es jedoch bislang an systematischer Untersuchung, validierten Anwendungen und adaptierter Methodik für großdimensionierte, offshore-typische Strukturen. Gleichzeitig steigen durch technologische Fortschritte in Fertigung, Simulation und Messmethoden (z. B. hochauflösende Oberflächen-scanner, digitale Bildkorrelation) die Machbarkeit und Attraktivität solcher Ansätze.

Im Projekt SMATRA wurde daher ein neues, wissenschaftlich fundiertes und praxisnahe Bemessungskonzept zur Schwingfestigkeit geschweißter maritimer Tragstrukturen entwickelt. Ziel ist die realitätsnahe Berücksichtigung lokaler Effekte wie Nahtgeometrie, Nachbehandlungen, mehrachsiger und variabler Beanspruchungen sowie der Abhängigkeit von Blechdicke und Rissfortschritt. Auf Basis experimenteller und numerischer Untersuchungen an Klein- und Großproben soll ein rechner-gestütztes, effizientes Nachweisverfahren entstehen, das eine sicherere, wirtschaftlichere und effizientere Auslegung ermöglicht und neue Fertigungs- und Nachbehandlungstechnologien schneller in die Praxis überführt.

2. Entwicklung und Validierung eines neuen lokalen Bemessungskonzepts für geschweißte maritime Tragstrukturen

2.1 Fortschritte bei der Vorhersage mehrachsiger und nichtproportionaler Beanspruchungen

Ein zentrales Ziel des Projekts SMATRA war die Verbesserung der Prognosegenauigkeit bei nicht-proportionalen, mehrachsigen Beanspruchungen – einer der größten Herausforderungen in der Ermüdungsbewertung von Offshore-Strukturen. Insbesondere bei Substrukturen von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) treten

Wind, Wellen und Gondelvibrationen zeitlich versetzt und aus unterschiedlichen Richtungen auf, was zu komplexen, nichtproportionalen Spannungszuständen führt. Bisherige Verfahren, wie sie in Normen wie IIW, Eurocode 3 oder der FKM-Richtlinie verankert sind, können diese Effekte nur unzureichend erfassen.

Im Rahmen von SMATRA wurde ein neuartiges Super-Ellipsen-Kriterium entwickelt [1], das die Spannungs- und Dehnungszustände in mehrachsigen, nichtproportionalen Lastfällen präziser abbildet. Dieses Kriterium basiert auf einer erweiterten Form der klassischen Ermüdungshypothese und berücksichtigt die zeitliche Abfolge und Richtungsänderung der Belastungen. Anhand einer umfassenden Datenbank, die sämtliche verfügbaren Schwingfestigkeitsversuche an Schweißverbindungen unter mehrachsiger Beanspruchung integriert, konnte die Leistungsfähigkeit des neuen Ansatzes validiert werden, siehe Abb. 2.

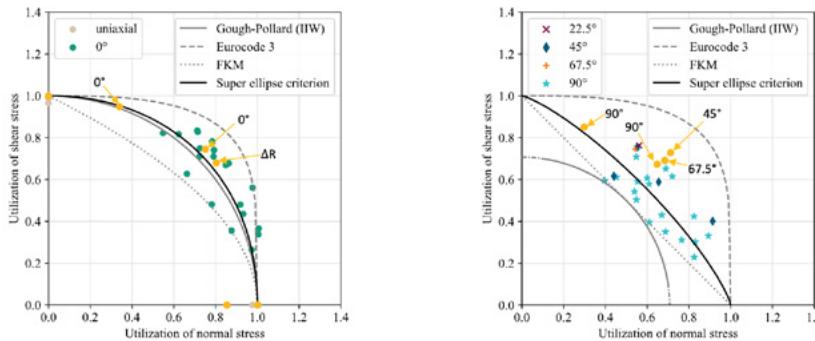


Abb. 2: Vergleich des neu entwickelten Super-Ellipsen Kriteriums mit bestehenden Konzepten aus internationalen Normen und Empfehlungen für einachsige und mehrachsige proportionale Belastungen (links) sowie nicht-proportionalen mehrachsigen Beanspruchungen (rechts) anhand einer im Projekt zusammengetragenen Datenbasis. Der Vergleich zeigt deutlich die signifikant bessere Beschreibung der Versuchsergebnisse durch das neu entwickelte Kriterium.

Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Verbesserung der Prognosegenauigkeit. Im Vergleich zu etablierten Methoden erreichte das Super-Ellipsen-Kriterium eine Steigerung der Vorhersagegenauigkeit um 24 bis 77 %, insbesondere bei nichtproportionalen Lasten. Diese

Verbesserung ist entscheidend, da sie die Gefahr von überkonserватiven Auslegungen reduziert und gleichzeitig die Sicherheit nicht beeinträchtigt.

2.2 Berücksichtigung von variablen Amplituden und Mittelspannungen

Die Übertragung der neuen Methode auf variable Amplituden (VAL) und Mittelspannungen (MAB) war ein weiterer zentraler Schritt.

Die klassische Lebensdauerprognose basiert oft auf konstanten Lasten, während reale Betriebsbedingungen durch stark schwankende Lasten gekennzeichnet sind. Im Projekt wurde gezeigt, dass die Methode zur Lebensdauerabschätzung unter mehrachsiger, nichtproportionaler Beanspruchung auch auf variable Amplituden übertragbar ist. Hierzu wurde lediglich eine Transformation der variablen Amplituden in konstante Amplitudenäquivalente mittels der IIW-Transformationsvorschriften durchgeführt. Die resultierenden Vorhersagen zeigten eine vergleichbare Genauigkeit wie bei Versuchen mit konstanter Amplitude.

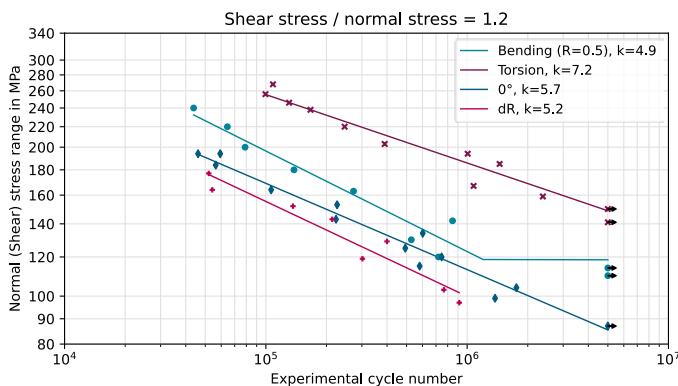


Abb. 3: Ergebnissen der Versuche mit verschiedenen R-Verhältnissen

Ein weiteres Defizit in der Literatur war die fehlende systematische Untersuchung des Mittelspannungseinflusses unter mehrachsiger Beanspruchung. Um diese Lücke zu schließen, wurden spezielle Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt, bei denen Proben mit

unterschiedlichen R-Werten (Verhältnis von Mindest- zu Maximalspannung) unter ein- und mehrachsiger Belastung belastet wurden, siehe Abb. 3. Alle Proben wurden vorher spannungsarmgeglüht, um den Einfluss von Eigenspannungen zu minimieren. Die Ergebnisse zeigten, dass der Einfluss der Mittelspannung bei nichtproportionaler Beanspruchung keinen signifikanten Unterschied gegenüber proportionalen Lasten aufwies. Dies ist ein wichtiger Hinweis für die praktische Anwendung. Die klassischen Mittelspannungs-Korrekturverfahren können in vielen Fällen auch bei mehrachsigen Lasten verwendet werden, ohne dass zusätzliche, komplexere Modelle erforderlich sind.

2.3 Realitätsnahe Abbildung der Nahtgeometrie und Blechdicke

Ein entscheidender Fortschritt wurde bei der Berücksichtigung der lokalen Nahtgeometrie und der Blechdicke erzielt. Traditionelle Methoden verwenden oft vereinfachte, idealisierte Geometrien, die die tatsächlichen Spannungsspitzen nicht zuverlässig abbilden. Im Projekt wurde gezeigt, dass die exakte Abbildung der Schweißnahtform (insbesondere der Übergänge zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff) entscheidend für die Vorhersage der Rissinitiierung ist.

Durch die Kombination von 3D-Oberflächenscans mit Finite-Elemente-Simulationen konnte die Rissinitiierung präzise vorhergesagt werden. In einem Ermüdungsversuch an einem manuell geschweißten Stahl-T-Stoß traten die ersten Risse genau dort auf, wo sie auch im Modell mit realer Geometrie vorhergesagt wurden. Dies bestätigt den hohen Mehrwert detaillierter Geometriedaten. Die Verwendung von Reverse-Engineering und digitaler Bildkorrelation (DIC) ermöglichte es, kritische Stellen in Offshore-Strukturen frühzeitig zu identifizieren und gezielt zu optimieren.

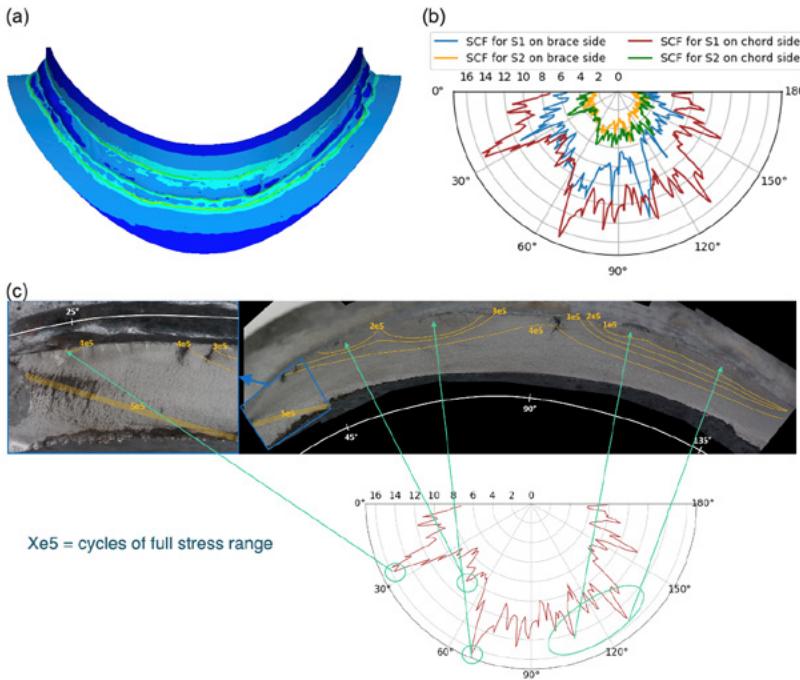


Abb. 4: Vergleich der ersten Hauptspannung für das FE-Modell mit dem tatsächlichen Schweißnahtscan (a) und bewerteten Spannungskonzentrationen für S1 und S2 an den Schweißnahtkanten von chord und brace (b) des Modells aus (a), sowie Vergleich der ersten Hauptspannung am versagenden Nahtübergang mit den Anrißstellen und Risswachstum entlang des Nahtübergangs (c) [2]

Darüber hinaus wurde eine Methode entwickelt, die die Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von der Blechdicke und der Nahtgeometrie quantitativ erfasst. Diese Methode wurde für verschiedene Rohrknoten- und T-Stoß-Details validiert und ermöglicht eine präzisere Lebensdauerabschätzung, die direkt in die Konstruktion einfließen kann. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst geringfügige geometrische Verbesserungen (wie eine glatte Übergangsform oder eine optimierte Nahtprofilierung) erhebliche Verbesserungen der Ermüdungsfestigkeit bewirken können, siehe Abb. 5.

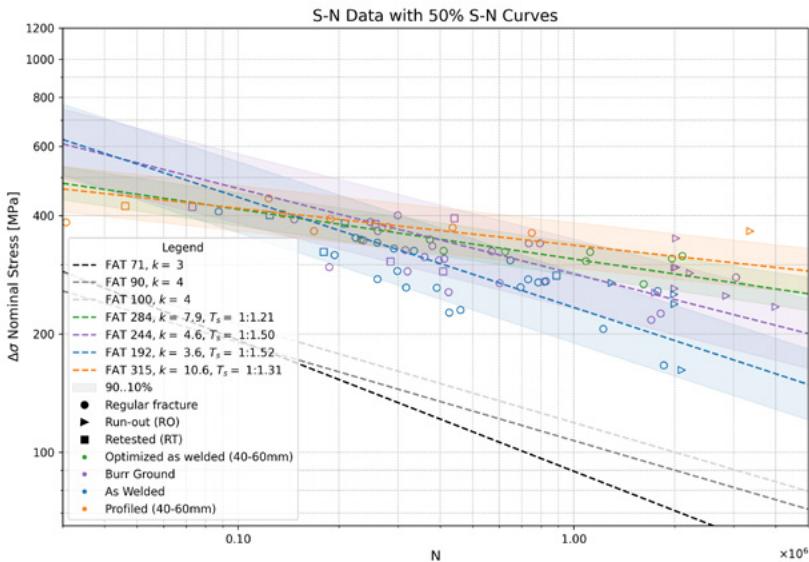


Abb. 5: Ergebnisse der Versuche mit nachbehandelten und nahtformoptimierten T-Stoß Proben. Die Ergebnisse wurden für die unterschiedlichen Blechdicken korrigiert.

2.4 Fortschritte bei der Modellierung von Rissentstehung und Rissfortschritt

Ein wesentlicher Fortschritt war die Entwicklung eines zwei-Phasen-Lebensdauermodells, das zwischen der Rissentstehung und der Rissfortschrittphase differenziert. In der ersten Phase wird ein lokaler, spannungsbasierter Ansatz verwendet, der Effekte wie Nahtgeometrie, Nachbehandlung und mehrachsige Beanspruchung berücksichtigt. In der zweiten Phase wird ein bruchmechanisches Modell eingesetzt, das die Rissausbreitung simuliert.

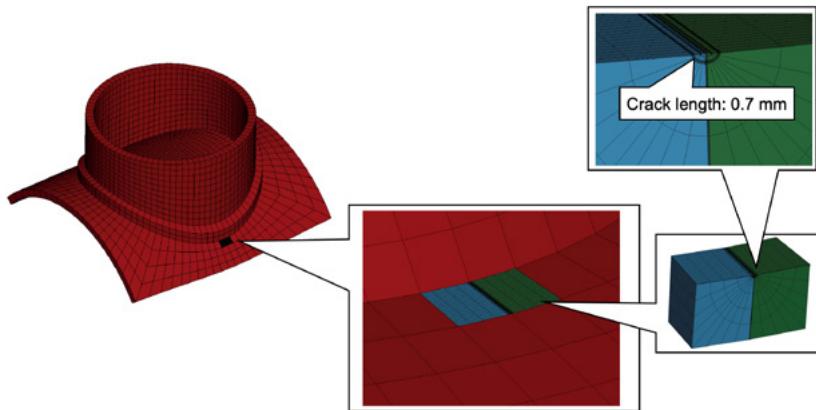


Abb. 6: Simulation der Rissfortschrittsphase an einem T-Rohrknoten im wie geschweißten Zustand

Für die Rissfortschrittsimulation wurde eine neuartige Methode, das h-adaptive Element Splitting (h-AES) [3], weiterentwickelt. Diese Methode ermöglicht eine gezielte Netzverfeinerung in der Nähe des Rissfront, ohne dass Elemente gelöscht werden müssen, was zu einer starken Netzabhängigkeit und numerischen Instabilität führen kann. Die h-AES-Methode wurde erfolgreich in zwei Beispielen getestet, wobei die Ergebnisse gut mit analytischen Lösungen übereinstimmten. Die Methode ermöglicht eine realistische Abbildung von Rissausbreitung in großmaßstäblichen Strukturen wie Schiffsrümpfen oder Offshore-Plattformen, während gleichzeitig der Rechenaufwand um mehr als eine Zehnerpotenz reduziert wird.

Da die h-AES-Methode für komplexe, gekrümmte Geometrien wie Rohrknoten noch zu rechenintensiv war, wurde zusätzlich ein integriertes bruchmechanisches Konzept auf Basis der linearen elastischen Bruchmechanik (LEFM) nach Bowness und Lee [4] angewandt. Dieses Konzept ermöglicht eine präzise Abschätzung der Rissfortschrittsdauer mit einer Abweichung von weniger als 20 % gegenüber Versuchsergebnissen, bei deutlich geringerem Rechenaufwand. Dies macht es für die industrielle Anwendung geeignet.

2.5 Experimentelle Validierung an Klein- und Großproben

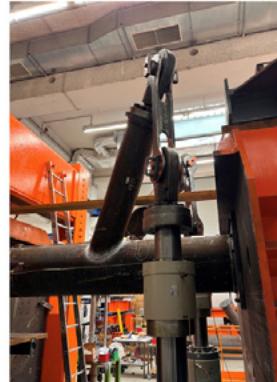
Um die entwickelten Methoden zu validieren, wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt. Dazu gehörten Kleinproben (T-Stöße, Rohr-Flansch-Verbindungen) und ein Großversuch an einem Doppel-Y-Knoten im Labor des Instituts für Konstruktion und Festigkeit der TUHH. Die Proben wurden aus S355J2-Stahl gefertigt, wie er typischerweise in Offshore-Fundamenten verwendet wird. Die Fertigung erfolgte durch erfahrene Industriepartner, um eine hohe Qualität sicherzustellen.

Die Versuchsstände wurden speziell für mehrachsige Beanspruchungen (Biegung und Torsion) entwickelt und mit digitaler Bildkorrelation und Dehnmessstreifen ausgestattet, um Anrißbildung und Risswachstum präzise zu erfassen. Vor den Ermüdungsversuchen wurden alle Schweißnähte mit Laserscannern erfasst, um die Geometrie in den FE-Modellen exakt abzubilden. Die Ergebnisse bestätigen die hohe Aussagekraft der entwickelten Methodik. Die Vorhersagen der Rissinitiierung und -ausbreitung stimmen sehr gut mit den experimentellen Befunden überein.

(a)



(b)



(c)



(d)



Abb. 7: Großproben (a) und Großversuchsprüfstand (b) des ausgewählten Doppel-Y-Knoten im Labor der TUHH. Die gut sichtbaren weißen Bereiche an den Schweißnähten stammen von den Geometriescans und der Vorbereitung der DIC Messungen.
 (c) Nahaufnahme der Schweißnähte des Großversuchsrohrknotens mit deutlich erkennbarer Instrumentierung durch Dehnmessstreifen und Rissen entlang der Schweißnähte.
 (d) Prüfstand für mehrachsige Beanspruchung von Rohr-Flansch-Verbindungen unter Biegung und Torsion inklusive kamerabasiertem Schweißnahtmonitoring zur Anriserkennung mithilfe von DIC am Fraunhofer LBF.

2.6 Entwicklung einer praxisnahen Entwurfsumgebung

Ein zentraler Aspekt des Projekts war die Entwicklung einer praxisnahen Entwurfsumgebung, die eine Grundlage für den Einsatz des neuen Nachweiskonzepts in der Bemessungspraxis liefert. Die Anwendung hochauflösender FE-Modelle war bisher durch hohe Rechenzeiten und komplexes Modellieren stark eingeschränkt.

Um dies zu lösen, wurden drei teilautomatisierte Werkzeuge entwickelt:

1. Schalenmodell-Generator für Rohrknoten mit Last- und Lagerungsszenarien,
2. Volumenmodell-Generator mit realistischer Schweißnahtgeometrie,
3. Submodell-Generator für lokale Spannungsanalysen.

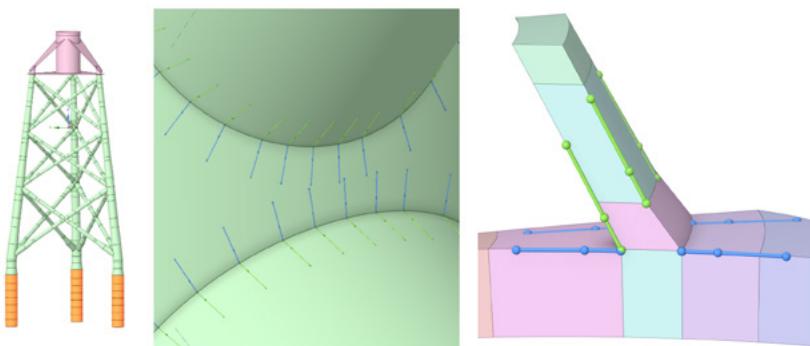


Abb. 8: Visualisierung automatisch angeordneter Hotspots und der zugehörigen Auslesepfade: Jacket, Detail eines Jacketknotens, Schnitt durch eine Schweißnaht im Bereich eines Jacketknotens

Die Schlüsseltechnologie ist die halbautomatische Erstellung hexaederförmiger Makronetze, die eine effiziente Netzverfeinerung in kritischen Bereichen ermöglicht. Dadurch konnte die Berechnungszeit um mehr als eine Zehnerpotenz gegenüber herkömmlichen Ansätzen reduziert werden. Submodelle mit noch feinerer

Auflösung können ebenfalls automatisch erstellt werden, wobei die Berechnungszeiten weiterhin handhabbar bleiben.

Zusätzlich wurde ein interaktives Analysewerkzeug entwickelt, das die Schädigungsbeiträge nach Beanspruchungskonstellationen, Schwingspielgrößen und Schnittgrößen aufschlüsselt. Dies ermöglicht eine gezielte Optimierung der Struktur sowohl auf globaler Ebene (Tragwerk) als auch auf lokaler Ebene (Schweißnahtgeometrie).

3. Fazit

Das Forschungsprojekt SMATRA hatte das Ziel, ein lokales numerisches Bemessungskonzept für die Schwingfestigkeit geschweißter maritimer Tragstrukturen zu entwickeln und experimentell abzusichern. Im Fokus stand die Überwindung der Grenzen klassischer Nachweisverfahren, die für Offshore-Strukturen häufig zu konservativen und damit kostenintensiven Auslegungen führen.

Ein zentrales Ergebnis war die signifikante Verbesserung der Prognosegenauigkeit bei mehrachsigen Beanspruchungen. Mit dem neu entwickelten Super-Ellipsen-Kriterium konnte eine Steigerung der Vorhersagequalität um 24 % bis 77 % im Vergleich zu etablierten Regelwerken wie IIW, Eurocode 3 oder der FKM-Richtlinie erreicht werden. Besonders bei nichtproportionalen Belastungen zeigte sich eine deutliche Überlegenheit gegenüber bisherigen Ansätzen.

Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass die exakte Abbildung der Schweißnahtgeometrie einen entscheidenden Einfluss auf die Prognosegenauigkeit besitzt. Vereinfachte Modelle waren nicht in der Lage, reale Rissursprünge zuverlässig zu erfassen. Erst durch die Kombination von 3D-Oberflächenscans mit Finite-Elemente-Simulationen konnten die tatsächlichen Anrißorte präzise vorhergesagt werden. Die experimentelle Validierung an T-Stoß- und Rohrknotenproben bestätigte die Robustheit dieses Ansatzes.

Auch die Entwicklung eines zweiphasigen Lebensdauermodells mit separater Betrachtung von Rissentstehung und Risswachstum ermöglicht es, die Restlebensdauer von Rohrknoten in Offshore Windenergieanlagen präziser als bisher vorherzusagen. Während für die Initiierungsphase lokale spannungsbasierte Konzepte mit Geometrie- und Nachbehandlungseinfluss eingesetzt wurden, kam in der Wachstumsphase ein weiterentwickeltes h-adaptives Element-Splitting-Verfahren (h-AES) und ein linear elastisches bruchmechanisches Konzept nach Bowness und Lee [4] zum Einsatz. Dadurch war es möglich, Rissfortschritte mit Abweichungen von weniger als 20 % gegenüber Versuchsergebnissen vorherzusagen. Gleichzeitig konnten die Rechenzeiten durch optimierte Modellierungs- und Vernetzungsstrategien um mehr als eine Zehnerpotenz reduziert werden, sodass der Einsatz solcher Verfahren in praxisnahen Studien realisierbar wurde. Für typische Optimierungsarbeiten sind aber noch weitere Verbesserungen notwendig.

Die wirtschaftliche Relevanz des Projekts konnte durch Vergleichsstudien untermauert werden. Durch die Anwendung des neuen lokalen Nachweiskonzepts wurden Materialeinsparungen von über 25 % beim Schweißnahtvolumen und eine spürbare Reduktion der erforderlichen Blechdicken aufgezeigt bei gleichem Sicherheitsniveau. Dies eröffnet ein erhebliches Potenzial zur Kostensenkung im Bau zukünftiger Offshore-Strukturen.

Literatur

- [1] N.M. Bauer, J. Baumgartner, Multiaxial fatigue life calculation of welded joints made of ductile materials. Welding in the World, (2025). <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02080-9>
- [2] S.M. Küster, M. Braun, Numerical Prediction of Fatigue Crack Initiation Locations in Offshore Tubular T-Joints using Actual and Idealized Weld Geometries. International Institute of Welding IIW-Doc. XIII-3049-2024 (2024).
- [3] S. Song, M. Braun, B. Wiegard, H. Herrnring, S. Ehlers, Combining H-Adaptivity with the Element Splitting Method for Crack Simulation in Large Structures. Materials, 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15010240>
- [4] D. Bowness, M.M.K. Lee, Fracture mechanics assessment of fatigue cracks in offshore tubular structures. (2002).

03SX560

Red-Emi

Reduktion der hydroakustischen Emission von Propulsionssystemen

Autorenliste

SCHOTTEL GmbH

Jan Geese

Andreas Bender

Technische Universität Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud

Raphael Bevand

Robert Beckmann

Mecklenburger Metallguß GmbH

Märtha-Luise Wendland

Lutz Kleinsorge



1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten ist ein stetiger Anstieg der weltweiten Schifffahrt zu verzeichnen. Grund dafür ist unter anderem die zunehmende Globalisierung und das damit verbundene höhere Handelsaufkommen. Infolgedessen hat sich der Hintergrundgeräuschpegel signifikant erhöht. Schätzungen gehen von einem Anstieg um etwa 3,3 dB pro Dekade seit dem Jahr 1950 aus (Frisk, 2012).

Dieser Anstieg überschneidet sich in vielen Frequenzbereichen mit denen, die Meerestiere zur Kommunikation und Orientierung nutzen. Auftretende Maskierungseffekte durch sich überlagernde anthropogene Schallquellen stören die überlebenswichtigen akustischen Signale und können zu Kommunikationsabbrüchen, Desorientierung, Verhaltensänderungen und Stressreaktionen führen.

Entsprechend zeigen sich bei EU-Behörden und internationalen Organisationen wie der IMO wachsende Bemühungen zur Regulierung und Reduktion der Unterwasserschallemissionen. Häfen wie Vancouver und Prince Rupert bieten bereits Gebührennachlässe für geräuscharme Schiffe. Zeitgleich registrieren auch die im Vorhaben involvierten Industriepartner MMG und SCHOTTEL als Hersteller von Propulsionsanlagen eine verstärkte Nachfrage nach einer Bewertung ihrer Produkte hinsichtlich der Schallemissionen.

Eine Hauptquelle des Unterwasserschalls ist die Propulsionsanlage, insbesondere der Propeller. Neben Kavitation tragen auch periodische Wasserverdrängung, turbulente Nachlaufströmung und hydrodynamisch induzierte Strukturanregungen, etwa am Schiffsrumph oder Gehäuse von Azimut-Anlagen, zur Geräuschemission bei.

Die Notwendigkeit, Propulsionsanlagen hinsichtlich ihrer Schallemissionen im industriellen Umfeld quantitativ bewerten zu können, wird deutlich. Derzeit fehlt es der Industrie jedoch an verlässlichen Simulationsmethoden. Daher war das Hauptziel des Vorhabens Red-Emi, Rechenverfahren zur genauen Bestimmung der hydro-

akustischen Emissionen von Propulsionsanlagen zu entwickeln. Diese Verfahren sollen eine präzise Quantifizierung der Unterwasserschallemissionen ermöglichen. Durch die Einbindung in den Entwurfsprozess soll gezeigt werden, dass damit der Entwurf geräuscharmer Propulsionsorgane möglich ist.

2. Verfolgte Ansätze und Methodiken

Modellversuche im Kavitationstunnel ermöglichen die Messung des akustischen Spektrums von Propellern. Jedoch können Maßstabs- und Skalierungseffekte sowie die dadurch induzierten Fehler die Ergebnisgüte negativ beeinflussen. Zudem ist diese Methode bei leisen Propellern nur eingeschränkt einsetzbar, da häufig die Hintergrundgeräusche der Versuchsanlage dominieren. Die Bewertung verschiedener Propellerentwürfe in Modellversuchen ist außerdem aufwendig und kostenintensiv. Dies erschwert eine frühzeitige Bewertung der akustischen Emissionen im Entwurfsprozess.

Demgegenüber existieren Simulationsmethoden, die bereits früh im Auslegungsprozess Anwendung finden können. Ansätze wie die Finite-Volumen-Methode sind weit verbreitet zur Berechnung viskoser Strömungen und werden zusammen mit Reynoldsgemittelten Turbulenzmodellen im industriellen Umfeld intensiv genutzt. Obwohl diese Methoden eine hohe Genauigkeit aufweisen, gehen sie mit einer nicht vernachlässigbaren Rechenzeit einher. Hier kommen vereinfachte Ansätze wie die auf der Potentialtheorie basierende Panelmethode ins Spiel. Diese ermöglicht die Simulation einer Vielzahl von Konfigurationen in kurzer Zeit und stellt ein adäquates Mittel im Spannungsfeld zwischen Genauigkeit und Rechenzeit dar. Diese Methoden sind jedoch in der Auflösung des Frequenzbereiches des Schallspektrums beschränkt. Aktuell reicht die Genauigkeit der beiden Methoden für eine hydroakustische Simulation realitätsnaher Fälle nicht aus.

Die Auflösung volumetrischer hydrodynamischer Schallquellen auf dem Propellerblatt und im Propellernachlauf geht über den Stand

der Technik hinaus und wurde im Vorhaben gezielt weiterentwickelt. Dazu zählen Kavitations- und Wirbelerscheinungen im Propeller-nachlauf sowie deren Interaktion mit Festkörpern (z. B. Rudern). Ziel des Vorhabens war daher die Weiterentwicklung numerischer Ansätze zur verlässlichen Simulation der Unterwasserschallab-strahlung. Hierfür wurden die Paneelmethode panMARE der TUHH sowie Finite-Volumen-Methoden (FVM) auf Basis von OpenFOAM eingesetzt.

Die TUHH konzentrierte sich auf die Implementierung verbesserter Modelle zur Abbildung von Nachlaufwirbeln und Kavitation in panMARE. Es wurde ein Kavitationsmodell für den Spitzenwirbel entwickelt und eine Methode zur Berechnung der Interaktion der Nachlaufschleppe mit einem Ruder erarbeitet.

Mithilfe dieser Methoden und der FVM untersuchte MMG den Einfluss von Entwurfs- und Betriebsparametern auf den propeller-induzierten Schall, um diese Ergebnisse für einen schallreduzierten Propellerentwurf zu nutzen.

Für die Gesamtabstrahlung des Systems muss die Interaktion zwischen Strömung und Struktur berücksichtigt werden. SCHOTTEL entwickelte hierfür eine Methode zur Fluid-Struktur-Interaktion (FSI), die eine kombinierte hydrodynamische und strukturmechanische Berechnung des Schalls erlaubt.

Zur Validierung der numerischen Methoden wurden im Rahmen des Vorhabens bei den Industriepartnern MMG und SCHOTTEL akustische Großausführungsmessungen mit zwei Schiffen durchgeführt. Ausgewählte Betriebspunkte konnten anschließend simuliert und durch Vergleich mit den experimentellen Daten hinsichtlich ihrer Genauigkeit evaluiert werden.

3. Großausführungsmessung

Abbildung 1 zeigt die Schiffe der akustischen Großausführungs-messungen: Ein High Speed Cargo Vessel und eine Double-Ended Ferry. Die Hauptabmessungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Das High Speed Cargo Vessel wird mit einer konventionellen Wellen-anlage und einem Verstellpropeller betrieben. Die Double-Ended Ferry ist hingegen mit zwei SCHOTTEL Azimut-Propulsionsanlagen vom Typ SRE 560 ausgestattet. Die zugehörigen Propellerdaten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Entscheidend für die Auswahl dieser Schiffe war die Verfügbarkeit im Zeitraum des Vorhabens und das Vorhan-densein von Propeller- und Schiffsdaten bei den jeweiligen Partnern.



(a)



(b) (Kimmerl, et al., 2024)

Abb. 1: High Speed Cargo Vessel (a) und Double-Ended Ferry (b) für die Großaus-führungsmessung

Tab. 1: Hauptabmessungen der untersuchten Schiffe der Großausführungsmessungen

	High Speed Cargo Vessel	Double Ende Ferry
Länge über alles	159,8 m	134,0 m
Breite	25,0 m	21,0 m
Tiefgang	7,5 m	4,7 m

Tab. 2: Propellerdaten der untersuchten Propeller der Großausführungsmessungen

	P489	SRE 560 CP
Durchmesser	5,5 m	3,1 m
Flügelzahl	4	4
Steigungsverhältnis bei $r/R=0,7$	0,961	1,052
Flächenverhältnis	0,598	0,486

Die jeweiligen Unterwasserschallmessungen wurden von JASCO ShipConsult durchgeführt und ausgewertet. Begleitend wurden von SCHOTTEL Körperschallmessungen an der Anlage der Double-Ended Ferry durchgeführt, die zur Validierung der strukturmechanischen Simulation eingesetzt wurden.

4. Entwicklung der numerischen Methoden

Das an der TUHH weiterentwickelte Randelementverfahren panMARE wurde im Rahmen des Projekts umfassend optimiert und erweitert (Abdel-Maksoud, et. al., 2025). Ziel war es, zentrale physikalische Prozesse im Propellernachlauf sowie deren Wechselwirkungen mit Auftriebsflächen und Kavitationsphänomenen numerisch präziser und stabiler abzubilden.

Unstrukturierte Vernetzung beliebiger Oberflächen

Mit Abschluss des Projekts steht in panMARE ein Gittergenerator zur Verfügung, mit dem beliebige Oberflächen unstrukturiert vernetzt werden können (Beckmann et al., 2024). Dieser kann, wie in Abbildung 2 dargestellt, u. a. dazu genutzt werden die Propellernabe mit Welle zu modellieren. Um die Vorteile des Gittergenerators für strukturiert und unstrukturiert vernetzte Geometrien zu nutzen, können die Gitter verschiedener Geometrien (z. B. Propellerblatt und -Nabe) getrennt vernetzt und anschließend zu einem Gesamtgitter zusammengeführt werden. Der Gittergenerator verwendet zwei unterschiedliche Ansätze zur Vernetzung: Eine strukturierte Ver-

netzung mit hyperbolischen Gittergenerierungsverfahren und eine unstrukturierte Vernetzung, welche auf dem Konzept der Advancing-Front-Methode basiert.

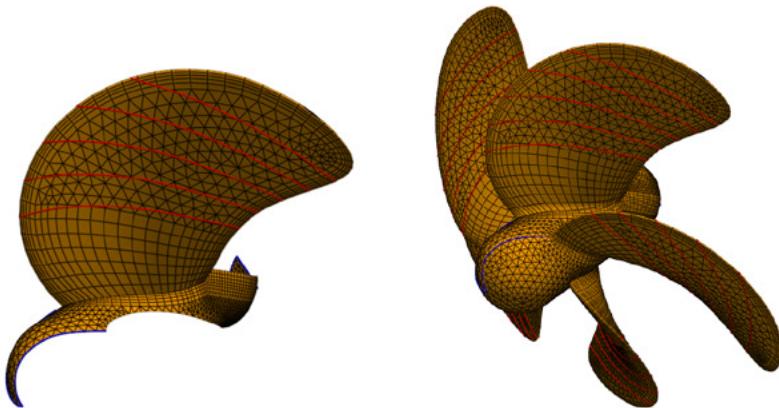


Abb. 2: Vernetzung – aus periodischen Segmenten (links) zusammengesetzte Propeller-geometrie mit Nabe (rechts)

Modellierung des Aufrollvorgangs

Zur verbesserten Modellierung des Aufrollvorgangs der freien Scherschicht hinter auftriebsbehafteten Körpern wurden drei Ansätze entwickelt und validiert: Der Transport der Dipolstärke zum Randwirbel, die adaptive Neuvernetzung der Wirbelfläche und die räumlich begrenzte Dämpfung des Aufrollvorgangs. Durch den Transport der Dipolstärke und die adaptive Neuvernetzung konnte die Vorhersage der Zirkulation und des induzierten Geschwindigkeitsfelds im Spitzenwirbelbereich verbessert werden.

Für Propellersimulationen wurde eine Methode implementiert, welche den Aufrollvorgang in einem räumlich beschränkten Bereich in der Region der Blattspitze und der Flügelwurzel dämpft. Mit dieser Methode konnte eine Verbesserung der numerischen Stabilität für spezielle Anwendungsfälle erreicht werden. Die Validierung erfolgte durch den Vergleich mit experimentellen Daten und hochwertigen Finite-Volumen-Simulationen (OpenFOAM), welche von den Projekt-partnern bereitgestellt wurden.

Interaktion freier Wirbel mit Auftriebsflächen

Die Interaktion freier Wirbel mit Auftriebsflächen wurde über eine Partitionierung des Strömungsproblems in mehrere Teilprobleme (Multi-Solver-Ansatz) umgesetzt. Über eine bidirektionale Kopplung tauschen die Teilprobleme zur Festlegung der Quellstärke auf den Auftriebskörpern untereinander desingularisierte Geschwindigkeiten aus.

Das ermittelte Strömungsfeld bildet Verdrängungseffekte, lokal veränderte Aufrollvorgänge und damit gekoppelte inhomogene Druckverteilungen in guter Übereinstimmung mit experimentellen und numerischen Vergleichsdaten ab. Abbildung 3 zeigt beispielweise die damit simulierte partielle Schichtkavitation auf einem Ruder im Propellerstrahl.

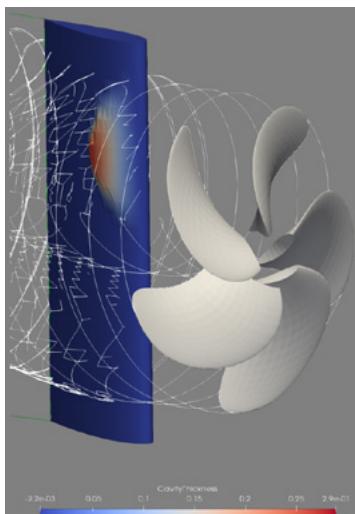


Abb. 3: Schichtkavitation auf einem Ruder im Propellernachlauf

Neben dem INSEAN-Propeller (Salvatore, et. al., 2006) wurde des Weiteren der Azimut-Propeller der Double-Ended Ferry mit dem Multi-Solver Ansatz simuliert. Dadurch konnte eine physikalisch korrekte Modellierung der gegenseitigen Beeinflussung zwischen freier Wirbelschicht und Auftriebsflächen erreicht werden, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Die Validierung erfolgte mithilfe von RANS-Simulationen für den INSEAN-Propeller und Large-Eddy-Simulationen (LES) für den Azimut-Propeller. Druckimpulse wurden im Randelementverfahren jedoch mit überhöhter Amplitude berechnet. Verbleibende Abweichungen sind auf Grenzschicht- und Ablöseprozesse zurückzuführen, die im aktuellen Verfahren nur eingeschränkt erfasst werden.

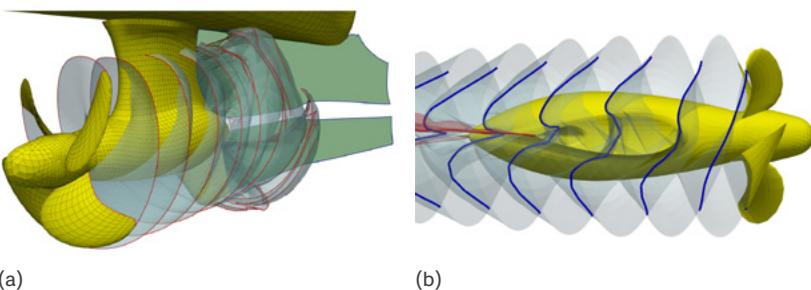


Abb. 4: (a) Interaktion der freien Wirbel mit Schiffsrumph und Azimut-Propeller; (b) asymmetrische Ausrichtung der freien Wirbel um die Propellergondel

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts war die Weiterentwicklung der Unterwasserschallprognose. Neue Interpolationsverfahren wurden für die Glättung numerisch bedingter Druckschwankungen im Nachstromfeld und die konsistente Darstellung externer Geschwindigkeitsfelder implementiert, was zu einer verbesserten Vorhersage von Druckschwankungen und Schallpegeln führte.

Im Bereich der Blattspitzen- und Nabenvirbelkavitation wurden bestehende Modelle erweitert (s. Abbildung 5). Erstmals kann die Nabenvirbelkavitation sowie deren Einfluss auf Druckimpulse und akustische Emissionen explizit berücksichtigt werden. In Abbildung 6 sind beispielhaft die induzierten Druckschwankungen durch die Spitzen- und Nabenvirbelkavitation gezeigt. Damit einhergehend war die erfolgreiche Implementierung der Ffowcs-Williams-Hawkings-Methode (FWH) für die Berechnung der akustischen Abstrahlung der Spitzenvirbelkavitation.

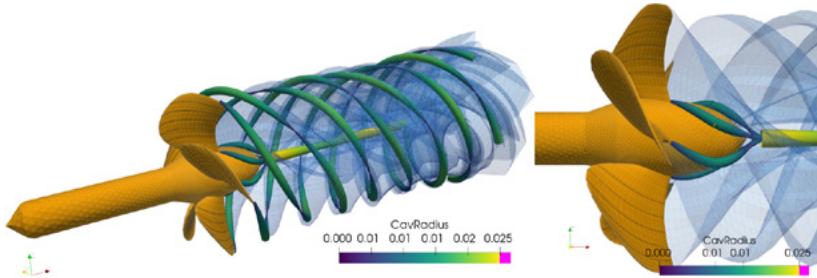


Abb. 5: Spitzen- und Nabenvirbel (im Detail rechts) im Nachlauf des Propellers.

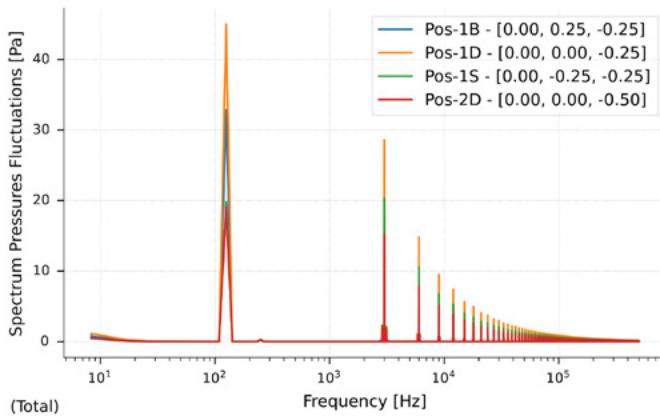


Abb. 6: Resultierende Druckschwankungen aus Spitzen- und Nabenvirbel

5. Methoden zur Auflösung von Schallquellen

Die im Projekt entwickelte Methode zur Berechnung der Fluid-Struktur-Interaktion basiert auf einem unidirektionalen Ansatz: Die zeitabhängige Druckverteilung auf dem Gehäuse wird zunächst strömungsmechanisch berechnet und anschließend als Eingangsgröße in eine Mehrkörpersimulation (MKS) überführt. Diese nutzt modellreduzierte Substitutionssysteme mit starren und flexiblen Körpern zur Reduktion des Rechenaufwands. In der MKS erfolgt zudem die Modellierung der Wälzlager und des Zahneingriffs der Kegelradstufe. Die Lagersteifigkeit wird durch nichtlineare Kraft-

elemente mit expliziter Berücksichtigung des Lagerspiels abbildet, da lineare Kraftelemente das reale Verhalten nicht ausreichend erfassen. Der Zahneingriff wird über einen Volumenkontakt modelliert. Zudem wurde eine umfangreiche Netzstudie durchgeführt. Darüber hinaus mussten die Kontaktparameter so eingestellt werden, dass diese mit den experimentell ermittelten Messwerten der Großausführungsmessung möglichst übereinstimmen. Die berechneten Lagerkräfte und -momente werden per FFT in den Frequenzbereich transformiert. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der akustischen Strukturemissionen mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) und dem Rayleigh-Integral zur Bestimmung der Schallabstrahlung. Als strukturmechanische Löser kamen Produkte der Firma Altair zum Einsatz.

Im Rahmen der Strömungssimulation wurde zur Bestimmung der Fernfeld-Schallemissionen die FWH-Methode genutzt. Um die Schallquelle zu simulieren, wurde die Propulsionsanlage von einer passiven Kontrolloberfläche umspannt, von der aus die Schallausbreitung berechnet werden kann. Zur Bildung des Gesamtpiegels wurden die Ergebnisse der hydrodynamischen und strukturmechanischen Emissionen aufsummiert. Das Berechnungsschema ist in Abbildung 7 visualisiert.

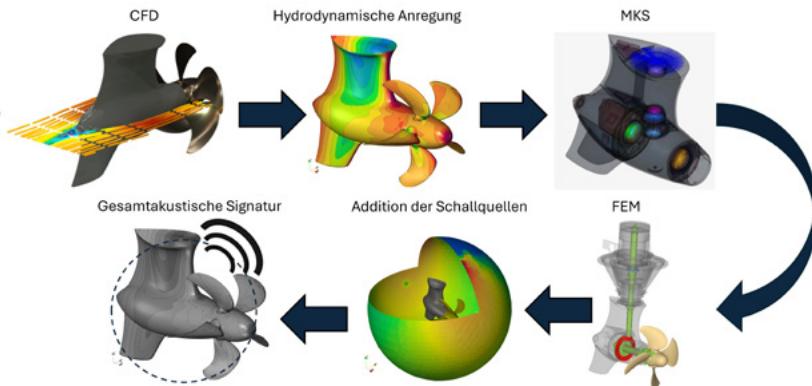


Abb. 7: Berechnungsablauf der strukturmechanischen Schallabstrahlung

6. Validierung der numerischen Methoden

Double-Ended Ferry

Die Unterwasserschallemissionen der SRE-Propulsionsanlage wurden mithilfe einer unidirekionalen FSI-Kopplung simuliert. Die Strömung wurde mit einer impliziten LES berechnet, da sich diese zur detaillierten Abbildung akustisch relevanter Wirbel- und Kavitationsstrukturen als besonders geeignet erwiesen hat. Die Kavitation wurde mit dem Schnerr-Sauer-Modell modelliert.

Bei der Netzerstellung wurde das gesamte Schiff berücksichtigt. Ein Ausschnitt des Rechengitters ist in Abbildung 8, die berechneten Nachlaufwirbel und die Kavitation in Abbildung 9 dargestellt. Im betrachteten Transit-Betriebspunkt ($v = 14,4 \text{ kn}$) tritt nur geringe Kavitation an der Eintrittskante des Propellers auf, periodisch zwischen drei und neun Uhr. Die Steigung des Verstellpropellers entspricht dabei annähernd der Auslegungssteigung.

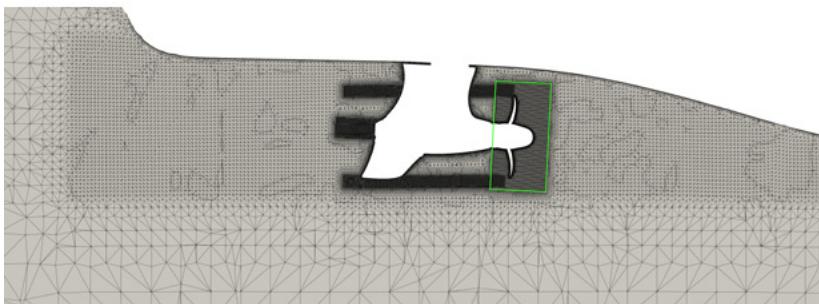


Abb. 8: Rechengitter mit AMI und passiver Kontrolloberfläche (grün)

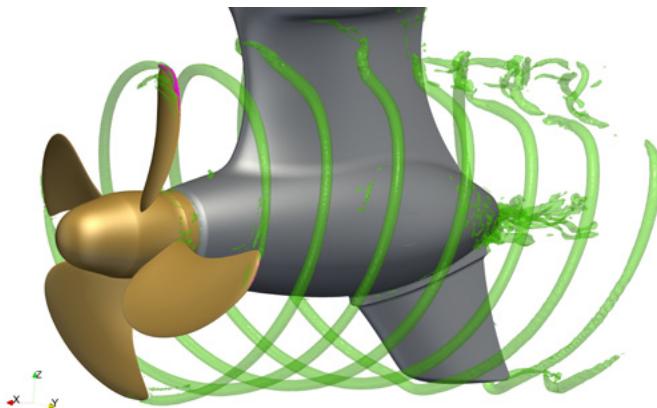


Abb. 9: Nachlaufwirbel und Kavitation der Double-Ended Ferry aus CFD-Simulation mit einer impliziten LES

In Abbildung 10 wurde der berechnete Unterwasserschall im Terzband mit den Messdaten der Großausführung verglichen. Für Frequenzen über 100 Hz zeigt sich ein Einfluss der Strukturmechanik mit einem Anstieg des Schalldrucks um ca. 2 dB, was die Relevanz der FSI-Kopplung unterstreicht. Insgesamt stimmen Simulation und Experiment gut überein; über einen weiten Frequenzbereich weichen die Ergebnisse um weniger als 5 dB ab. Einzelne tonale Abweichungen von etwa 10 dB treten auf. Im Bereich von 60 – 150 Hz zeigen sich signifikante Differenzen von 15 – 18 dB. Diese könnten auf Modellierungsgrenzen, externe Kavitations- oder Schiffsgeräusche oder eine Strukturanwort der Schiffshülle zurückzuführen sein.

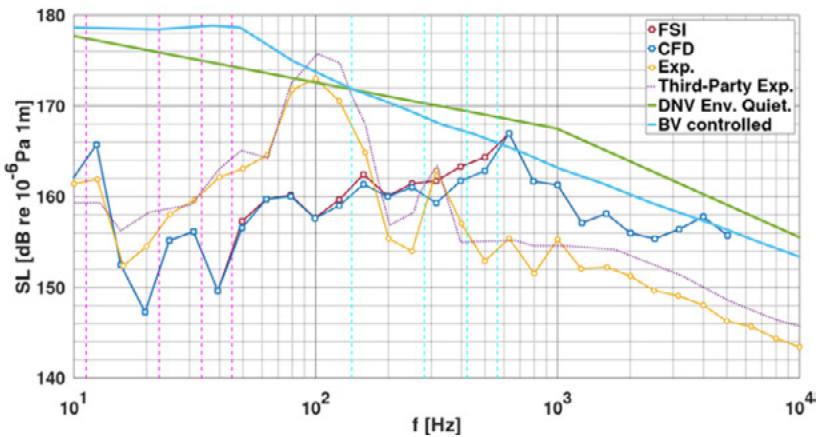


Abb. 10: Vergleich des berechneten Schalldrucks mittels CFD und FSI mit der Großausführungsmessung (Kimmerl, 2024)

High Speed Cargo Vessel

Die Schallemissionen des Verstellpropellers P489 wurden mithilfe der in panMARE integrierten FWH-Methode berechnet. Mittels dieser wurde der Schalleintrag sowohl aus der Schicht- als auch der Spitzenwirbelkavitation bestimmt. Die Spitzenwirbelkavitation wurde mittels der VoCav2D-Methode simuliert. Dem Propeller wurde ein Nachstromfeld aufgeprägt, welches mithilfe des Strömungs-lösers OpenFOAM ermittelt wurde, siehe hierzu Abbildung 11a. Die gewählte Gitterauflösung berücksichtigt einen effizienten Rechenaufwand bei möglichst aussagekräftiger Auflösung der Schicht- und Spitzenwirbelkavitation.

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 11b dargestellt. Der Propeller weist für den Design-Betriebspunkt eine umlaufende Schichtkavitation auf, die sich langsam auf- und ab der 10-Uhr-Stellung abbaut.

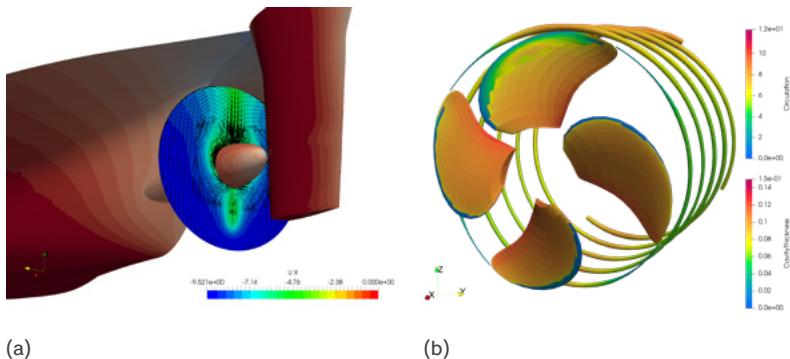


Abb. 11: (a) CFD-berechnetes Nachstromfeld; (b) Kavitationserscheinungen am P489 aus panMARE

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 12 den Ergebnissen der Großausführungsmessung gegenübergestellt. Methodenbedingt wird der abgestrahlte Schall in Abhängigkeit der Schallquelle (Schicht- / Spitzenwirbelkavitation) getrennt dargestellt. Der Schichtkavitation-induzierte Schall wird im mittleren Frequenzbereich ab 20 Hz deutlich höher berechnet als zunächst aus den Ergebnissen der GA-Messung hervorgeht. Hingegen weist der abgestrahlte Schallpegel aus der Betrachtung der Spitzenwirbelkavitation eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten der Großausführung auf. Wird eine energetische Überlagerung der Ergebnisse durchgeführt, so weist der propellerinduzierte Schallpegel aus panMARE einen den Ergebnissen der GA-Messung sehr ähnlichen Verlauf auf. Zusätzlich sind CFD-Simulationen mit dem RANSE-Löser OpenFOAM durchgeführt worden. Alle Methoden sind in Wendland, Kleinsorge & Klemstein (2024) zusammengefasst.

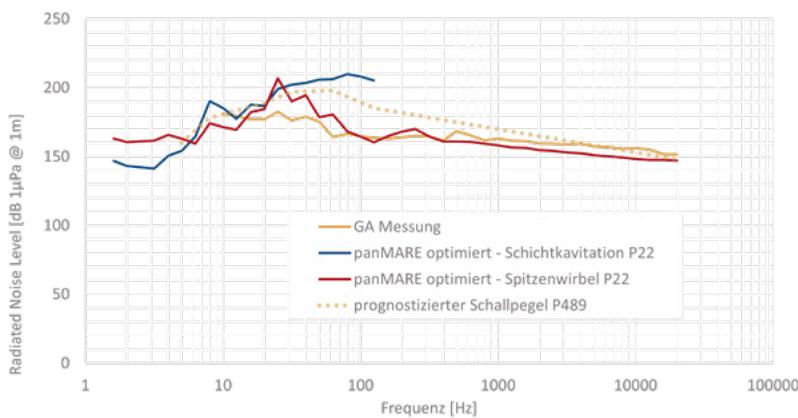


Abb. 12: Vergleich des berechneten Schalldrucks mittels panMARE mit der Großausführungsmessung

7. Anwendung der Methoden zur geräuschoptimierten Entwicklung

Die entwickelten Methoden ermöglichen die Quantifizierung der Unterwasserschallemissionen verschiedener Kombinationen aus Propulsionsanlagen und Schiff. Im Vergleich zu Großausführungs-messungen bestehen gewisse Ungenauigkeiten, die bei der Ein-haltung von Grenzkurven berücksichtigt werden müssen. Dennoch erlauben die Methoden vergleichende und quantifizierbare Analysen verschiedener Konfigurationen und sind somit ein wertvolles Werk-zeug im Entwurfsprozess geräuscharmer Propulsionssysteme.

Durch die spektrale Analyse der zeitabhängigen Druckverteilung lassen sich Optimierungspotenziale identifizieren und die Wirkung von Entwurfsparametern bewerten. Diese Auswertung kann auf beliebige aktive und passive Oberflächen angewendet werden und liefert richtungsabhängige akustische Informationen für ausge-wählte Frequenzen.

Am Beispiel des SRE 560 wurde eine starke Strukturanregung bei der zweiten Blattpassierfrequenz festgestellt. Durch Anpassung

der Wellensteifigkeit konnte die Schallabstrahlung von 143 dB auf 136 dB reduziert werden (Abbildung 13). Als weiteres Beispiel zeigt Abbildung 8 die Optimierung der Anbindung einer Querstrahlanlage, wodurch die maximalen Druckschwankungen auf der Anbindung um etwa eine Größenordnung verringert wurden.

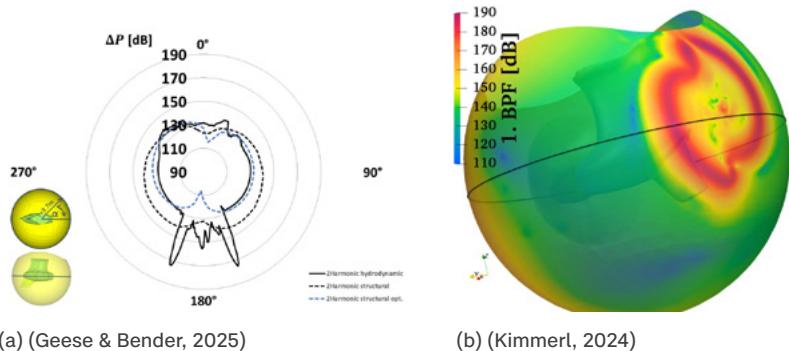


Abb. 13: (a) Reduktion der Schallabstrahlung durch Änderung der Propellerwellensteifigkeit; (b) induzierte Unterwasserschallemissionen berechnet mit CFD

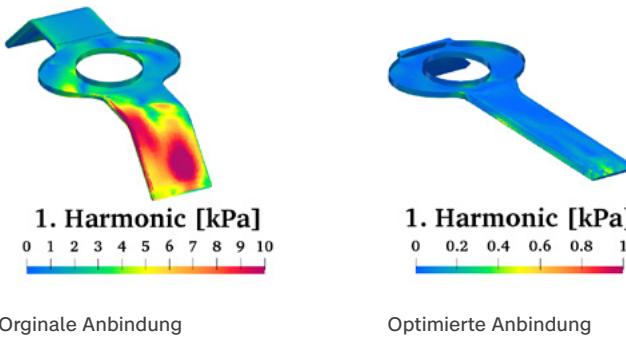


Abb. 14: Optimierung der Tunnel-Anbindung einer Querstrahlanlage

Im Rahmen des Vorhabens erstellte MMG eine Entwurfsstudie, bei der ein kommerzieller, effizienter Propellerentwurf akustisch optimierten Varianten gegenübergestellt wurde. Die Entwurfsparameter wie Flächenverhältnis, Wölbung, Steigungsverlauf und Flügelprofil wurden hierzu systematisch variiert. Aus dem Vergleich des abgestrahlten Schallpegels, der mithilfe der FWH-Methode

in panMARE bestimmt wurde, geht eine akustische Optimierung von 7 dB im Frequenzbereich < 100 Hz hervor.

Auf Basis der Untersuchungen lässt sich der Zielkonflikt aus hydroakustisch optimiertem Propellerentwurf gegenüber einem effizienten, energiesparenden Entwurf in Abbildung 15 anschaulich erklären. Hierzu ist die Zunahme der Antriebsleistung über dem Kavitationsvolumen aufgetragen. Die Schallreduktion wird ebenfalls in Abhängigkeit vom Kavitationsvolumen dargestellt. Ausgehend von maximal auftretender Kavitation bei höchstmöglicher Geschwindigkeit des jeweiligen Entwurfs sind die Ergebnisse prozentual angegeben. Zudem wird die Effizienz über das Verhältnis von Schub zu Drehmoment bewertet. Jeder Betriebspunkt eines Propellers ist durch ein spezifisches Kavitationsvolumen geprägt.

Um eine wesentliche Reduktion des propellerinduzierten Schalls im mittleren und hohen Frequenzbereich (>10 Hz) von knapp -5 % zu erreichen, ist eine Verringerung des Kavitationsvolumens von 80 % notwendig, damit einhergehend ist eine Steigerung des Leistungsbedarfs um ca. 3 % zu beobachten. Es zeigt sich jedoch auch, dass bereits eine Verringerung des Kavitationsvolumens um 40 % zu einem um ca. 2 % geringerem Schallpegel mit Effizienzeinbußen von lediglich < 1 % zu erzielen ist.

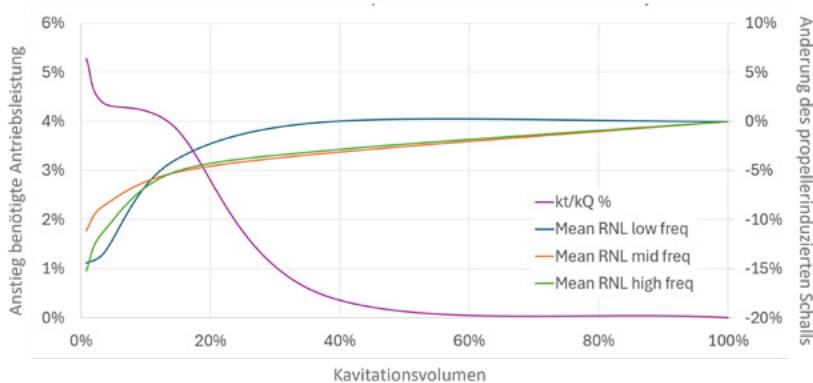


Abb. 15: Einfluss des Kavitationsvolumens auf den abgestrahlten Schall und die Effizienz des Propellers

8. Zusammenfassung

Mit dem Projekt Red-Emi wurde ein bedeutender Schritt zur akustischen Optimierung von Propulsionsanlagen erzielt. Es wurden Methodiken entwickelt, mit denen sich Propulsionsanlagen hinsichtlich ihrer Schallemissionen effizient bewerten lassen.

Die Weiterentwicklung der Paneelmethode panMARE ermöglicht es, den Einfluss von Designparametern unter realitätsnahen Bedingungen mit vertretbarem Rechenaufwand zu ermitteln und durch Gegenüberstellung verschiedener Konfigurationen zu bewerten. Es konnte gezeigt werden, dass gezielte Anpassungen eine Reduktion des propellerinduzierten Unterwasserschalls um bis zu 7 dB bewirken können – maßgeblich durch die Verringerung von Kavitation. Dies geht allerdings einher mit Wirkungsgradverlusten in der Propulsion.

Ergänzend erlauben die entwickelten Verfahren zur Fluid-Struktur-Kopplung und hochauflösten Flächenauswertung des Schalldrucks eine detaillierte Analyse der räumlichen Schallausbreitung. Des Weiteren lassen sich dadurch relevante Strukturanregungen gezielt identifizieren. Dies birgt einen großen Nutzen in der geräuschoptimierten Entwicklung und Auslegung von Propulsionsanlagen und Schiffen.

Die Methoden wurden anhand zweier Großausführungsmessungen validiert. Es hat sich gezeigt, dass die erzielte Genauigkeit der Methoden variabel ist, um zuverlässige Aussagen über absolute Schallpegel zu treffen. Dies unterstreicht die Komplexität des Themas und verdeutlicht den weiteren Forschungsbedarf.

Danksagung

Die Projektpartner bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ehemals Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) für die Förderung des Vorhabens sowie bei dem Projektträger Jülich für die Betreuung des Projekts.

Literatur

Abdel-Maksoud, M., Beckmann, R., Bévand, R. (2025). Kalkulation des durch Propulsionssysteme mit Rudern oder Flossenkappen emittierten Unterwasser-Schalls; Akronym: KRaWall; im Verbundvorhaben: Reduktion der hydroakustischen Emission von Propulsionssystemen; Akronym: Red-Emi. Technische Informationsbibliothek Hannover (2025)

Beckmann, R., Bévand, R., Grosjean, N., Götsche, U., Abdel-Maksoud, M. (2024) Approaches for performance prediction of marine propellers under open water test conditions using the boundary element method. Proceedings of 8th International Symposium on Marine Propulsors (SMP ,24), Berlin, Germany, March 2024.

Frisk, G. (2012). Noiseconomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports*.

Geese, J., & Bender, A. (2025). ASTERIA – Acoustic Emission of Structure-Rudder-propeller Interaction: Schlussbericht zu einem Verbundvorhaben im Rahmen des maritimen Forschungsprogramms des BMWK.

Geese, J., Kimmerl, J., Nadler, M., & Abdel-Maksoud, M. (2023). Adaptive Mesh Refinement for Trailing Vortices Generated by Propellers in Interaction with Slip-stream Obstacles. *Journal of Marine Science and Engineering*.

Kimmerl, J. (2024). Evolution of underwater noise emission prediction technology for ship-propulsor combinations in an industry environment. *Technology Research*, 286 – 297.

Kimmerl, J., Bender, A., Steffens, E., Bevand, R., Beckmann, R., & M., A.-M. (2024). Underwater Radiated Noise of a Double Ended Ferry with SRE Thrusters. Eighth International Symposium on Marine Propulsors. Berlin.

Salvatore, F., Pereira, F., Felli, M., Calcagni, D., & Felice, F. (2006). Description of the INSEAN E779A Propeller Experimental Dataset. Institute of Marine Engineering CNR-INM.

Wendland, M.-L., Kleinsorge, L., Klemstein, B. (2024). Determination of Underwater Radiated Noise of a Marine Propeller Using Different Prediction Methods in Proceedings of 8th International Symposium on Marine Propulsors (SMP ,24), Berlin, Germany, March 2024.

SimPleShip

**Simulationsplattform zur digitalen Gesamt-
systemanalyse und energetischen Betriebs-
optimierung komplexer Passagierschiffe**

Autorenliste

**Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und
Thermodynamik Rostock (FVTR) GmbH**

Dr.-Ing. Felix Dahms

Dr.-Ing. Michèle Schaub

Hochschule Wismar:

Institut für Schiffssimulation und Maritime Systeme (ISSIMS)

Dr.-Ing. Michael Gluch

Georg Finger

Universität Rostock:

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT)

Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Müller

Marouane Barbri

Max Zimmermann



Im Forschungsprojekt SimPleShip wurde als zentrales Ergebnis eine digitale Simulationsplattform entwickelt, mit der sich selbst sehr komplexe Schiffssysteme in allen Betriebszuständen analysieren und energetisch optimieren lassen. Die Plattform ermöglicht die Erstellung digitaler Zwillinge von ganzen Schiffen oder einzelnen Systemen. Auf dieser Grundlage können verschiedene Maßnahmen – wie etwa Retrofit-Lösungen oder angepasste Betriebsstrategien zur Steigerung der Effizienz, Reduzierung von Emissionen und Verbesserung der Nachhaltigkeit – simulationsgestützt bewertet und fundierte Entscheidungen getroffen werden.

1. Hintergrund und Einleitung

Die komplexe Infrastruktur des Gesamtenergiesystems an Bord von Passagierschiffen wie Fähren und Kreuzfahrtschiffen kann mit einer Kleinstadt verglichen werden. Diese Komplexität resultiert aus der gleichzeitigen Notwendigkeit, Menschen sowie gegebenenfalls Fahrzeuge und Güter zu transportieren und dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Bedürfnisse der Passagiere zu erfüllen.

Das Routenprofil der besagten Schiffsklassen besteht häufig aus küstennahen Fahrten und dem tageweisen Betrieb innerhalb verschiedenster Häfen. Bezogen auf den Maschinen- und Anlagenbetrieb ergibt sich daraus neben dem quasistationären Betrieb auf hoher See und ggf. während der Hafenliegezeiten ein hoher Anteil an Manöverfahrten, welcher durch ein sehr dynamisches Betriebs- bzw. Nutzungsverhalten geprägt ist. Gleichzeitig generieren auch die Energiebedarfe aus dem Hotelbetrieb ein instationäres Lastprofil, was der nautischen bzw. antriebsseitigen Lastdynamik überlagert ist und vom Leistungsbedarf her in einer vergleichbaren Größenordnung liegt.

Eine Analyse des Schiffsbetriebs der letzten Jahre zeigt zahlreiche Ansatzpunkte für Effizienzsteigerungen auf. Für Optimierungsmaßnamen müssen allerdings die Auswirkungen und Wechselwirkungen

bekannt sein bzw. ermittelt und gleichzeitig kunden- / passagierspezifische Komfortanforderungen berücksichtigt werden. Ziel führend ist an dieser Stelle ein digitales Modellierungstool, welches die angesprochenen Systeme in Form einer Simulation abbilden kann. Somit kann der Einfluss verschiedener Vorgehensweisen für unterschiedliche Situationen simulativ abgeschätzt und anschließend quantitativ bewertet werden.

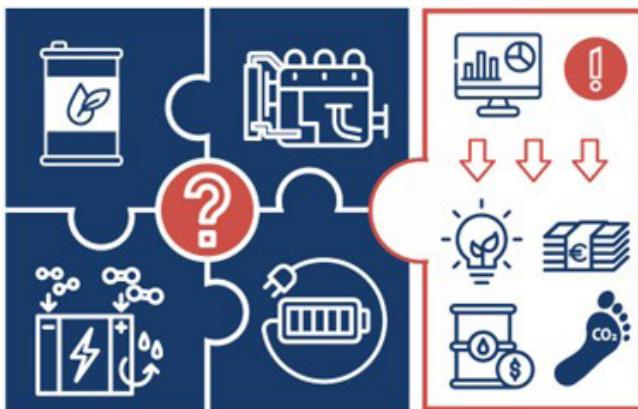


Abb. 1: Die Simulationsplattform ermöglicht eine physikalisch fundierte Entscheidungsfindung, um energie- und kostensparend Lösungen zu finden, wie bspw. bei der Planung der Energiebereitstellung.

Hinzukommen zunehmend strengere Gesetze und Vorschriften für den Seeverkehrssektor und ein zunehmender Wettbewerb auf den Transport- und Tourismusmärkten, was neue Ansätze für einen effizienteren und klimafreundlichen Schiffsbetrieb erfordert. Weitere Herausforderungen bestehen darin, unter einer Vielzahl von möglichen Konzepten, das richtige für das entsprechende Schiffe und dessen Anforderungen zu finden. Welche Lösung ist sowohl ökologisch als auch ökonomisch, ist für einen sicheren Schiffsbetrieb sinnvoll und bietet ausreichend Flexibilität? Wie soll also die zukünftige Energieversorgung von Schiffen gestaltet werden? Welche Rolle werden Verbrennungsmotoren und alternative Kraftstoffe in Zukunft spielen? Werden Batterien oder Brennstoffzellen das Mittel der Wahl sein? Oder wird es eine Kombination dieser Technologien

sein? Und wie sehen CAPEX, OPEX, Nachhaltigkeit und CO₂-Fußabdruck jeweils aus? Die Fragestellungen sind vielfältig und komplex.

Um diesen steigenden ökonomischen wie ökologischen Ansprüchen und der engen Verzahnung von Subsystemen gerecht zu werden, sollten die folgenden Aspekte in einer ganzheitlichen Simulationsumgebung durch die Bildung eines „Digital Twin“ abgebildet werden. Elementare Aspekte stellen die energetische Infrastruktur und die Antriebstechnologien einschließlich des dynamischen Maschinenbetrieb wie zum Beispiel beim Manövrieren dar.



Abb. 2: Hotellast, Antriebsleistung und energetische Bedarfe der Hilfsaggregate tragen zu einem Gesamtenergiebedarf bei, der durch die Energiewandler gedeckt werden muss.

Die Simulationsplattform deckt alle passagier- bzw. kreuzfahrt-schiffstypischen Aspekte ab – von Energiebereitstellung in konventionellen oder hybridisierten Antriebssystemen über Energiespeicherung in Tanks, Kesseln, Pools, Verteilsystemen und der Raumluft, bis hin zur Energieversorgung für die Schiffsleitung und alle hotel-seitigen Bedarfe.

2. SimPleShip – Das Konsortium

Zur Bearbeitung der komplexen Aufgabenstellung wurde ein fachübergreifendes Konsortium mit entsprechender Expertise gebildet. Dieses setzte sich zusammen aus dem Institut für Innovative Schiffs-Simulation und Maritime Systeme (ISSIMS) der Hochschule Wismar, dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) der Universität Rostock, dem Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock (FVTR) GmbH sowie dem assoziierten Praxispartner AIDA Cruises und dessen maritimem Dienstleister Carnival Maritime GmbH.

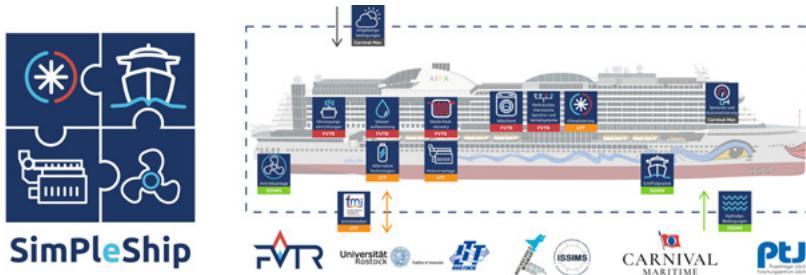


Abb. 3: Zusammenwirken der Projektpartner mit deren Aufgabengebieten im Projekt SimPleShip

Der assoziierte Partner **AIDA Cruises / Carnival Maritime GmbH** unterstützte das Projekt mit praxisnaher Beratung, einem großen Fundus an Messdaten sowie Schiffsanlagendokumentationen eines Referenzschiffes.

Das **Institut ISSIMS** stellte ein hydrodynamisches Schiffsmodell mit Steuer- und Antriebsorganen bereit, dessen Bewegungsverhalten dem des Referenzschiffes entspricht. Mit diesem hydrodynamischen Schiffsmodell lassen sich durch Nutzung des SAMMON Manöverplanungstools Manöverstrategien unter diversen Umwelteinflüssen bewerten. Die sich ergebenden Leistungsbedarfe für den Antrieb werden über eine Schnittstelle (FMI) an die SimPleship-Plattform weitergegeben.

Der **LTT** legte den Fokus auf die Nachbildung von Antriebstechnologien wie Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen zur weiteren Verwendung in der SimPleShip-Modellbibliothek. Darüber hinaus wurden Komponenten, wie beispielsweise Batteriespeicher und Submodelle des HLK-Systems (Heizung, Lüftung, Klimasystem) erstellt und parametrierbar gemacht.

Die **FVTR GmbH** als Projektkoordinator erstellte neben Komponenten, die insbesondere den Hotelbetrieb des Kreuzfahrtschiffes betreffen, auch Reglerstrukturen zur Komplementierung der Modelica-basierten Modellbibliothek. Anschließend wurden die einzelnen Komponenten zu in sich funktionsfähigen Teilmodellen zusammengefügt und danach zu einem Gesamtsystem gekoppelt.

3. Die SimPleShip-Plattform

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojektes bestand in der Entwicklung einer digitalen Simulationsplattform zur thermodynamischen Analyse und energetischen Optimierung von komplexen, gekoppelten Schiffssystemen. Diese simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung ist für vielfältige Fragestellungen anwendbar.

Neben der Schaffung einer physikalisch basierten Aggregatbibliothek zur Simulation von Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen, Batterien, thermischen Speichern, Verteilsystemen sowie den Vortriebs- und Steuerorganen, lag ein besonderer Fokus auf passagierschiffstypischen Anlagen, welche die sogenannte Hotellast darstellen. Die Modellbibliothek ist beliebig erweiterbar. Die Teilsysteme und Komponenten können je nach Fragestellung angepasst und zweckdienlich verbunden werden.

Das digitale Simulationswerkzeug ist insbesondere auch zur energetischen Analyse und Optimierung des Gesamtsystems „Schiff“ in transienten Betriebszuständen geeignet. Dadurch werden Potentialanalysen und Optimierung vor dem Hintergrund

bestimmter Szenarien möglich. Als Beispiele seien energetisch optimierte Hafenanläufe sowie der gleichzeitige Hafen- und Hotelbetrieb genannt. Es ist unter anderem abschätzbar, ob durch Einbindung von Speichersystemen und alternativen Energiewandlern ein Anlegermanöver unter der Vorgabe „Zero-Emission“ (wie z. B. perspektivisch in norwegischen Häfen ab 2026 bzw. 2032 gefordert) möglich ist und welche Voraussetzungen hierfür geschaffen werden müssen, vgl. 4. Anwendungsfall und Fragestellung „Zero-Emission-Szenario“.

Im Ergebnis beinhaltet die Plattform eine vollumfängliche Bibliothek, welche alle wesentlichen technischen Aspekte von Passagierschiffen abdeckt. Dies befähigt den Anwender (z. B. Reeder, Werften, Schiffsbetreiber, Dienstleister) zu quantitativ bewertbaren Szenario- und Retrofitanalysen bestehender Schiffe. Gleichzeitig kann bereits währende der Projektierungs- und Auslegungsphase von Neubauten durch die parallele Nutzung der Simulationsplattform mit den darin enthaltenen Komponenten- und Systembibliotheken eine realitätsnahe Evaluation der Gesamtwirkungsgrade im spezifisch geplanten Betriebsumfeld durchgeführt werden.

Die SimPleShip-Plattform umfasst zwei unterschiedlichen Ebenen, die abhängig von der Fragestellung Anwendung finden können:

- Einerseits die Modelica-basierte Ebene des komplexen Systemmodells (durch erfahrenen Simulationsingenieuren erstellt und nutzbar (s. Abb. 4, links))
- andererseits als aufbereitete und nutzerfreundliche App-Lösung für eine konkret definierte Anwendung (auch für Fachexperten ohne Erfahrung in spezifischer Simulationssoftware, s. Abb. 4 und Abb. 6, jeweils rechter Bildteil).

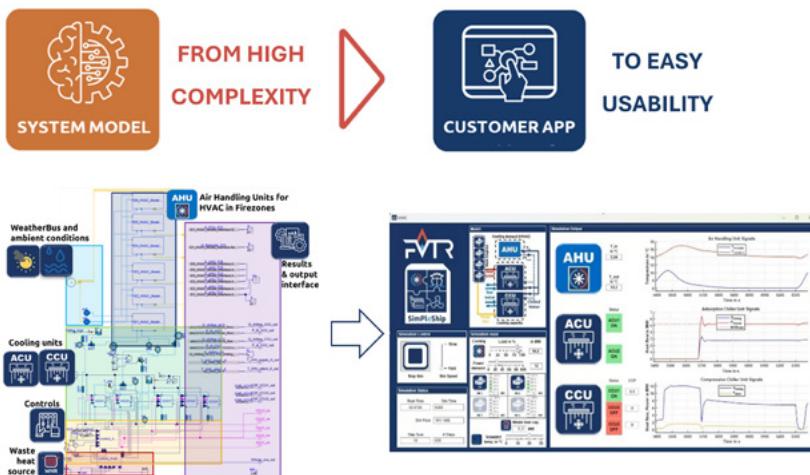


Abb. 4: HVAC-Subsysteme auf Systemmodell-Ebene mit Peripherie und Randbedingungen (links) Aufbereitung als benutzerfreundliche App (rechts)

Auf **Systemmodell-Ebene** können neben der Modellerstellung auch Fragestellungen im Rahmen einer Dienstleistung bearbeitet werden. Eine konkrete Problemstellung wird dabei an den Simulationsingenieur herangetragen, der mithilfe der Modellbibliothek ein digitales Abbild des betreffenden Energiesystems (einschließlich Untermodelle) erstellt, um die Fragestellung simulationsgestützt zu beantworten. Je nach Anforderung / Problemstellung richten sich Detailgrad und Rechenaufwand.

Soll beispielsweise die Reglerstruktur der Kälteanlagen optimiert werden, entwickeln die Programmierenden nach Absprache mit dem Nutzer (ein Projektpartner oder künftig auch ein Kunde) verschiedene Strategien, die anschließend anhand definierter Kriterien verglichen werden.

Auf der **Ebene einer App** können Nutzer auf Basis zuvor definierter Ein- und Ausgabewerte eigenständig verschiedene Strategien erproben, um eigenverantwortlich Lösungen für konkrete Fragestellungen zu entwickeln. Abb. 5 zeigt ein Beispiel einer solchen App zur Planung eines Auslaufmanövers durch den Geirangerfjord.

Die oben genannte Systemmodell-Ebene bildet im Hintergrund die Grundlage (BackEnd) für die leichter zugängliche Ebene der App (FrontEnd). Der Unterschied liegt darin, dass bei der App die Gestaltung des Systemmodells weitestgehend abgeschlossen ist und nur noch eine begrenzte Anzahl von Parametern und Eingabegrößen als variabel gestaltbar zur Verfügung stehen. Vorteilhaft ist dabei die nutzerfreundliche Darstellung von Ein- und Ausgabegrößen.

Die App kann dann als Standalone-Executable oder über einen Server als browserbasierte WebApp bereitgestellt werden. Im letzteren Fall erfolgen Zugriff sowie Nutzung online. Im Hintergrund berechnet die Anwendung die Ergebnisse für das zu untersuchende Gesamtsystem oder Teilmodell und stellt diese auf der Benutzeroberfläche in leicht verständlicher Form dar. Die erzeugten Resultate können anschließend miteinander verglichen und bewertet werden.



Abb. 5: Die auf der SimPleShip-Plattform basierende App ermöglicht es Nutzern, verschiedene Strategien zur Energiebedarfsdeckung systematisch zu planen und zu evaluieren, hier am Beispiel des Geirangerfjords.

4. Anwendungsfall und Fragestellung „Zero-Emission-Szenario“

Der Schifffahrtssektor steht vor der Herausforderung, in Zukunft emissionsfrei zu operieren. Internationale Vorgaben wie CII, EEDI, EEXI sowie die 2023 gestartete IMO-GHG-Strategie und die EU-Verordnung FuelEU Maritime setzen dafür konkrete Rahmenbedingungen. Besonders ambitionierte Ziele verfolgt Norwegen: In ausgewählten Fjorden, die zum UNESCO-Weltkulturerbe zählen, soll ab 2026 bzw. 2032 ein Zero-Emission (ZE)-Betrieb eingeführt werden. Der erhebliche Energiebedarf von Kreuzfahrtschiffen erfordert daher gezielte Effizienzstrategien – vor allem im Bereich der Hotellast und des Manövrierens.

Das Verbundprojekt SimPleShip untersuchte exemplarisch, wie sich technologische und operative Maßnahmen zur Emissionsreduzierung realistisch bewerten und vergleichen lassen. Im Fokus standen dabei praxisnahe Szenarien unter den speziellen Rahmenbedingungen eines ZE-Betriebs im norwegischen Geirangerfjord. Es wurden demnach zwei ZE-Szenarien definiert, bei denen die Ortschaft Geiranger angelaufen bzw. wieder verlassen wird. Abb. 6 zeigt oben links die Region des Weltnaturerbes, unten links den elektrischen Leistungsbedarf beim Einlaufen (blau) nach Geiranger bzw. beim Auslaufen (rot). Rechts in der Abbildung ist ein Manöverplan abgebildet, welcher mithilfe eines hydrodynamischen Schiffsmodells durch Simulation erstellt wurde.

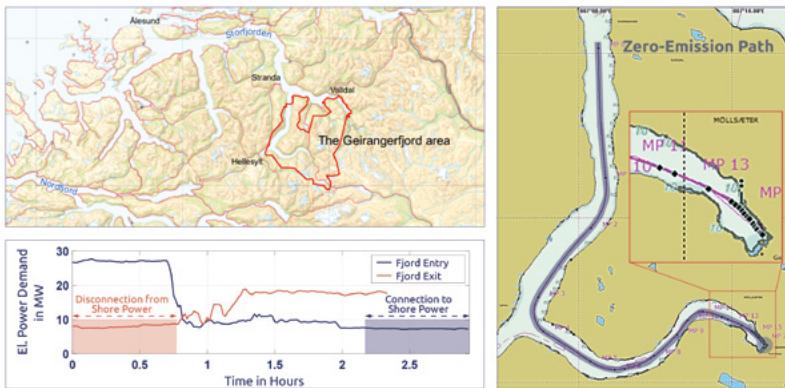


Abb. 6: Beispieldaten für Zero-Emission-Strategien im Geirangerfjord

Reiner Batteriebetrieb, Landstrom und thermische Speicher

Eine Möglichkeit, den ZE-Anforderungen nachzukommen, ist die Nutzung einer Batterie während der Fahrt bzw. die Nutzung von Landstrom während des Hafenaufenthalts. Den Messdaten konnte entnommen werden, dass im regulären Betrieb rund 97 MWh chemisch gebundene Energie (MGO) erforderlich sind, um die Strecke von 17,5 nm durch den Fjord (eine Richtung) zurückzulegen.

Wichtig ist, dass die im konventionellen Betrieb verfügbare Abwärme der Motoren substituiert werden muss, um die Wärmeversorgung im ZE-Betrieb weiterhin sicherzustellen (vgl. Abb. 7). Mithilfe der SimPleShip-Plattform konnte ermittelt werden, wie sich die elektrischen und thermischen Bedarfe mit einer Batterie decken lassen, wenn elektrische Boiler, Wärmepumpen oder thermische Speicher für die Verfügbarkeit von Heißwasser und Dampf zum Einsatz kämen.

Folgende Möglichkeiten zur Bereitstellung der benötigten thermischen Energie wurden betrachtet:

- Option 1: elektrische Heißwasserbereiter (HW) und elektrische Boiler zur Niederdruck- und Hochdruck-Dampfversorgung (LP- und HP-Steam);
- Option 1b: wie Konfiguration 1, aber mit zusätzlichem thermischem Speicher
- Option 2: Wärmepumpe zur Heißwasserbereitung und elektrische Boiler zur Dampfversorgung
- Option 3: Wärmepumpe zur Heißwasserbereitung und Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Niederdruck-Dampferzeugung sowie elektrische Boiler zur Hochdruck-Dampferzeugung;
- Option 3b: wie Option 3, aber mit zusätzlichem thermischem Speicher

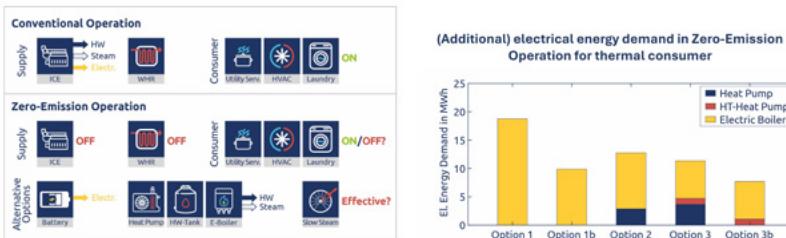


Abb. 7: Zusätzlicher elektrischer Energiebedarf für die Heißwasser- und Dampfbereitung, der entsteht, wenn die Abwärme der Hauptmaschinen – wie im reinen Batteriebetrieb – nicht zur Verfügung steht. Option 1, 2 und 3 ohne Warmwasserspeicher, Optionsvarianten 1b und 3b mit Warmwasserspeicher

Die SimPleShip-Plattform ermöglicht zudem die Dimensionierung von Batterien. Die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten von Maßnahmen werden in Abb. 8 graphisch dargestellt, so dass auch der nötige Platzbedarf ersichtlich wird. Dank thermischer Speicher und weiteren Energieeinsparmaßnahmen kann die Batterie kleiner ausfallen, allerdings nehmen die Speichervolumen dabei erheblich mehr Platz ein.

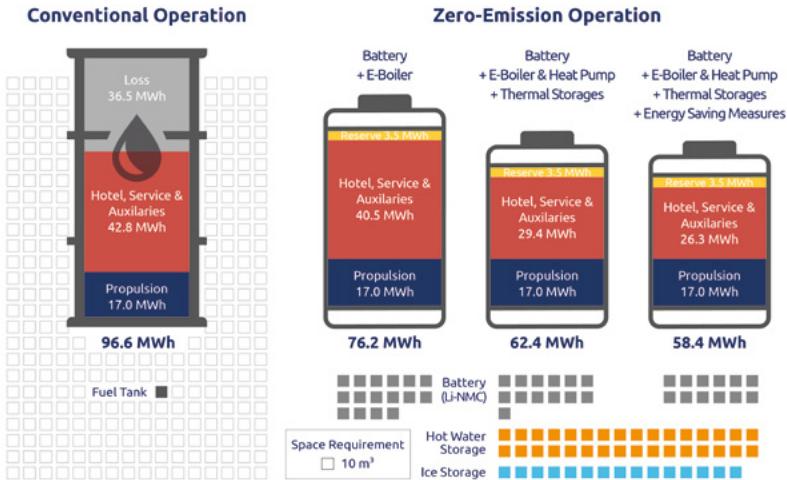


Abb. 8: Batteriedimensionierung für ein Zero-Emission-Szenario mit Angabe zum Platzbedarf

Bei den im Referenzszenario gemessenen Außentemperaturen von etwa 13 °C während des Einlaufmanövers lag der Kältebedarf bei rund 10 MWh_{therm} (entspricht etwa 1,4 MWh_{el}). Eine Erhöhung der Außentemperatur um 10 K würde zu einer Verdopplung der Kühllast führen. Für die Sicherstellung von Schiffssicherheit und Reisekomfort sind unter Berücksichtigung solcher Umwelteinflüsse bei der Planung elektrische Energiereserven in der Größenordnung von mindestens 3,5 MWh_{el} vorzusehen.

Im Vergleich zum Energiebedarf des konventionellen Betriebs (96,6 MWh) ergibt sich bei reinem Batteriebetrieb und Nutzung von E-Boiler eine erforderliche Batteriekapazität von 76,2 MWh_{el} (vgl. Abb. 8). Durch die Integration zusätzlicher Effizienzmaßnahmen bis hin zum Ultra-Low-Power-Betrieb kann dieser Wert auf bis zu 58,4 MWh_{el} gesenkt werden. Dabei sind ein nutzbarer Ladebereich von 80 % sowie eine notwendige Kapazitätsreserve bereits berücksichtigt.

Die Realisierung eines Zero-Emission-Betriebs ohne direkte Nutzung von Kraftstoff ist somit nur mit entsprechend dimensionierten Batteriesystemen möglich. Angesichts der hohen Investitionskosten und der technischen Herausforderungen bei der Integration an Bord leisten die hier vorgestellten Analysen einen wertvollen Beitrag zur Vorbereitung und Bewertung entsprechender Investitionsentscheidungen.

Alternative Kraftstoffe und Abwärmenutzung

Alternativ zum reinen Batteriebetrieb wird in dem betreffenden ZE-Gebiet auch die Nutzung alternativer Kraftstoffe erlaubt sein, insbesondere kohlenstofffreie Kraftstoffe wie Wasserstoff und ggf. auch Ammoniak, sofern eine geeignete Abgasnachbehandlung und Sicherheitsaspekte Berücksichtigung finden (alternativ: unter Auflagen zur Abgasnachbehandlung, usw.). Da sowohl die Verfügbarkeit als auch der Preis dieser Kraftstoffe schwer vorhersagbar sind, sollte – wie auch beim Batteriebetrieb – viel Wert auf Energieeinsparmaßnahmen gelegt werden.

Die Nutzung alternativer Kraftstoffe erfordert nicht zwangsläufig den Einsatz eines Verbrennungsmotors (ICE). Stattdessen kann auch eine Brennstoffzelle als Energiewandler verwendet werden. Die SimPleShip-Modellbibliothek stellt hierfür entsprechende Komponenten bereit, um die derzeitige Ausstattung des Referenzschiffes im „digitalen Zwilling“ flexibel zu erweitern. Dazu zählen verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die auf unterschiedlichen Temperaturniveaus arbeiten und mit unterschiedlichen Kraftstoffen betrieben werden können.

Bei Vorhandensein von Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen ist die intensive Abwärmenutzung ein elementarer Bestandteil bei Effizienzmaßnahmen. Die Nutzung von Absorptionskälteanlagen statt Kompressionskälteanlagen zur Bereitstellung von Chilled Water für die Klimatisierung bringt im vorliegenden Fjord-Szenario beispielsweise eine Kraftstoffeinsparung von 3 %.

Abwärme in Form von Abgasenthalpie wird auf dem Referenzschiff über sogenannte Economizers geleitet und in Folge zur Bereitstellung von Hoch- bzw. Niederdruckdampf genutzt. Denkbar ist, dass überschüssiger Dampf über eine Niederdruck-Dampfturbine geleitet wird und damit die Deckung des elektrischen Leistungsbedarfs zu unterstützt. Welchen zusätzlichen Nutzen diese Maßnahme bringt, wäre mit statischen Berechnungsverfahren eher schwierig zu ermitteln. Eine Einspeisung der erzeugten elektrischen Energie ins Bordnetz führt nämlich zu einer geringeren Auslastung der Hauptmaschinen, was wiederum zu weniger Abwärme führt. Um den energetischen Nutzen einer Dampfturbine bewerten zu können, sind die dynamischen Modelle der Simulationsplattform, die Rückkopplungen innerhalb des Systems zulassen, ideal. Tatsächlich würde eine Dampfturbine während des hier betrachteten Manöverbetriebs nur 0,2-0,3 % Einsparung bringen. Im Sea-Mode hingegen, bei voller Fahrt voraus, können Einsparungen von über 3 % erwartet werden. Schließlich finden die Fahrten zwischen zwei Häfen bei Kreuzfahrten meist nachts statt, wenn die wesentlichen Dampfverbraucher wie die Wäscherei, die Küche und der Bio-Sludge-Dryer kaum oder gar nicht in Betrieb sind. Die überschüssige Abwärme wird im aktuellen Bordbetrieb ungenutzt ans Seekühlwasser abgegeben.

Energieeinsparpotenziale als unterstützende Maßnahme

Weitere Einsparpotenziale wurden im Hotel- und Servicebereich identifiziert sowie im operativen nautischen Betrieb. Beispielsweise würde das kurzzeitige Abschalten der Poolheizungen ($0,96 \text{ MWh}_{\text{therm}}$) während der Zero-Emission-Einfahrt – simulationsbasiert abgeschätzt – zu einem Abkühlen des Poolwassers von durchschnittlich rund 3 K führen. Ähnliche Überlegungen können zu weiteren Dampfverbrauchern getätigter werden.

Auch unter nautischen Gesichtspunkten besteht an Bord des Versuchsträgers weiteres Potenzial zur Effizienzsteigerung. Routenoptimierung sowie sicheres und energieeffizientes Manövrieren gehören zum täglichen Betriebsziel. Im Projekt SimPleShip wurde durch den Projektpartner Hochschule Wismar die bestehende SAMMON Manöverplanungs-Software weiterentwickelt und an

die Anforderungen der Projektpartner angepasst. Ziel ist die Planung und spätere Überwachung komplexer Schiffsmanöver unter realistischen Bedingungen. Die Software basiert auf einem digitalen Zwilling, der mittels Differenzialgleichungen die Schiffsbewegungen unter variierenden Umweltbedingungen simuliert. An definierten Manöverpunkten (MP) können Vorgaben zu Ausrichtung und Leistung der Manövriereinrichtungen gemacht werden. Dank der sogenannten Fast-Time-Simulation lässt sich innerhalb einer Sekunde Rechenzeit eine Manöversequenz von bis zu 24 Minuten simulieren. Auf der prognostizierten Bahn kann ein neuer Manöverpunkt definiert werden, ab dem veränderte Kommandos greifen. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Manöverstrategien im Voraus planen, analysieren und optimieren, bevor sie in der Praxis umgesetzt werden. Abb. 6 (rechter Bildteil) zeigt beispielhaft einen solchen Plan für das Einlaufen in den Geirangerfjord. Die berechneten Energiebedarfe der Antriebsanlagen können direkt als Randbedingungen über eine FMU an die SimPle-Ship-Plattform übergeben werden. Umwelteinflüsse wie Wind, Strömung und Außentemperatur sind Faktoren, die in der Praxis nicht zuverlässig vorhersehbar sind. So können unterstützende Bedingungen beim Manövrieren (z. B. 5 Bft Rückenwind und 0,2 kn Strömung in Fahrtichtung) den Antriebsenergiebedarf signifikant (rund 2 MWh_{el}) senken, während gegenläufige Einflüsse den Bedarf in einem ähnlichen Maße erhöhen.

Je nach Manöverstrategie kann der nautische Offizier den Leistungsbedarf für die Antriebs- und Steuerorgane unterschiedlich beeinflussen. Mithilfe der Manöverplanungs-Software können solche Strategien ohne viel Aufwand ausprobiert, sichtbar gemacht und auf einer objektiven Ebene verglichen werden. Abb. 9 stellt einen Vergleich zweier möglicher Manöverstrategien bezüglich ihres Leistungsbedarfs dar.

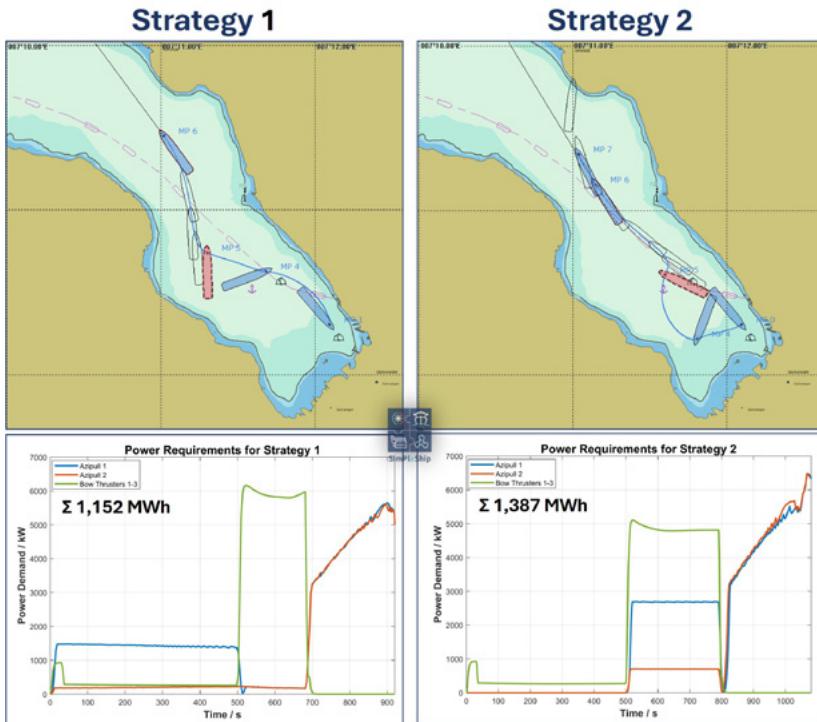


Abb. 9: Vergleich zweier Manöverstrategien nach ihrem Leistungsbedarf um dasselbe Manöverziel zu erreichen: Strategie 1 benötigt weniger Zeit (920 s) und weniger Energie (1,152 MWh), während Strategie 2 eine Zeit von 1080 s benötigt und einen Energiebedarf von 1,387 MWh aufweist.

Unter Anwendung dieser Planungs-Software konnten außerdem die Auswirkungen von „Slow Steaming“ auf den Energiebedarf der Antriebssysteme und in Kopplung mit der Simulationsplattform der Gesamtenergiebedarf des Schiffs inklusive Hotellast detailliert untersucht werden. Während diese Strategie bei Containerschiffen häufig zur Effizienzsteigerung beiträgt, kann sie sich im Kontext eines kurzzeitigen Zero-Emission-Szenarios bei Kreuzfahrtschiffen eher nachteilig auswirken. Die verlängerte Manöverdauer kann trotz reduziertem Antriebsenergiebedarf zu einem insgesamt höheren Energieverbrauch führen. Der Hotelbetrieb bleibt mit verhältnis-

mäßig hoher Auslastung über die längere Fahrzeit hinweg aktiv und verursacht dadurch einen zusätzlichen Energiebedarf, der die Einsparungen im Antrieb übersteigen kann.

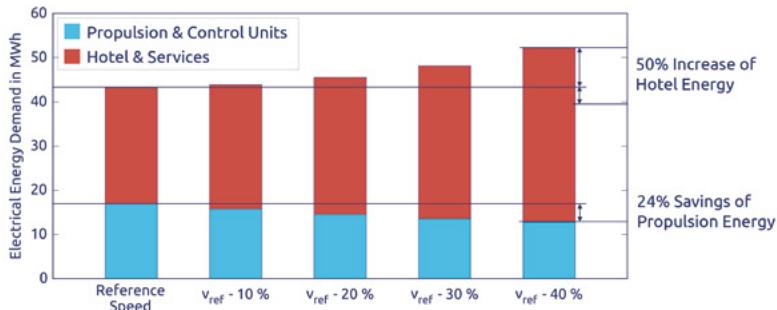


Abb. 10: Auswirkungen von „Slow Steaming“ auf den Energiebedarf der Antriebssysteme (bis zu 24 % Einsparung) und den hotelseitigen Energiebedarf (Anstieg um bis zu 50 %) bezogen auf das Zero-Emission-Referenzszenario

5. Schlussbetrachtung

Eine passende Strategie zur Emissionsreduktion für ein konkretes Schiff und dessen Einsatzprofil zu finden, stellt eine erhebliche Herausforderung dar, insbesondere im Spannungsfeld zwischen alternativen Kraftstoffen, operativen Maßnahmen, dem Einsatz neuer Technologien bei Neubauten oder Nachrüstungen. Wesentlich ist eine klare Definition dessen, was unter „Zero Emission“ zu verstehen ist: Bezieht sich dies ausschließlich auf CO₂, könnten auch synthetische oder biogene Kraftstoffe eine Rolle spielen. Werden jedoch weitere Schadstoffe wie Partikel, Stickoxide (einschließlich Lachgas) oder Formaldehyde einbezogen, führt langfristig kein Weg an der Nutzung elektrischer Speicher vorbei. Ein Zero-Emission-Betrieb ohne Verbrennungsmotor ist demnach nur mit entsprechend großen Batteriesystemen realisierbar. Die mit der SimPleShip-Plattform erfolgten Analysen können als Grundlage für Investitionsentscheidungen dienen, da sie sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen.

Die SimPleShip-Plattform ist ein leistungsfähiges Werkzeug zur digitalen Gesamtsystemanalyse und energetischen Optimierung komplexer Schiffe. Sie ermöglicht nicht nur die Abbildung bestehender Anlagenkonfigurationen, sondern auch die Simulation innovativer Kombinationen und Regelungsstrategien sowie die Bewertung neuer Technologien. Der Modelica-basierte, modulare Ansatz erlaubt die multiphysikalische Modellierung mit Berücksichtigung von Trägheiten und Rückkopplungen im Systemverhalten. Damit lassen sich neben konventioneller Technik auch zukünftige Technologien wie Brennstoffzellen, thermische Speicher, Dampfturbinen zur Nutzung von Überschussdampf oder Photovoltaikanlagen in realistischen Betriebsszenarien bewerten, und zwar unter Einbezug realer Schiffsrouter und Umwelteinflüsse.

Das Projektergebnis ist nicht nur eine reichhaltige und erweiterbare Modellbibliothek, die in der SimPleShip-Plattform Anwendung findet. Essenziell ist auch die bei der Projektbearbeitung entstandene und weiter sich entwickelnde Methodik der Problemerfassung, der zielgerichteten Modellierung, des Umgangs mit Messdaten insbesondere zur Parametrierung und Modellvalidierung sowie auch der nutzerfreundlichen Aufbereitung von Ergebnissen.

Danksagung

Das Verbundforschungsvorhaben „SimPleShip“ (FKZ: 03SX561) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über den Projektträger Jülich aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

ThermoMarE

**Fortschrittliche Thermoelemente-Technologie
für hybride maritime Heizsysteme unter
Einbeziehung elektrischer Batterietechnik**

Autorenliste

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. – Institut für Frontier Materials auf der Erde und im Weltraum

Pawel Ziolkowski

SCHEER Heizsysteme & Produktionstechnik GmbH

Constantin Kinias

Patrick Schmidt

Isabellenhütte Heusler GmbH & Co. KG

Nils Rink



1. Motivation und Projektziele

Energieeffiziente Lösungen in den Bereichen Energieerzeugung und -verbrauch sind entscheidend, um nationale und internationale Energie- und Klimaziele zu erreichen. Besonders im maritimen Sektor werden innovative Ansätze benötigt, die den branchenspezifischen Herausforderungen und Rahmenbedingungen in Deutschland gerecht werden.

Thermoelektrische Generatoren (TEG), aufgebaut aus thermoelektrischen Modulen (TEM Abb. 1), wandeln durch den Seebeck-Effekt – einen Festkörpereffekt, der insbesondere in halbleitenden Materialien sehr ausgeprägt ist – Wärme direkt in elektrische Energie um. Diese Technologie arbeitet ohne bewegliche Teile, ist nahezu wartungsfrei und gilt daher als äußerst robust. Die erzeugte elektrische Energie kann in Batterien gespeichert oder direkt zur Versorgung elektrischer Verbraucher genutzt werden. Die Leistungsfähigkeit von TEG hängt wesentlich von den erreichbaren Temperaturdifferenzen ab, die an installierte TEM geführt werden können. Mit steigendem Temperaturunterschied nehmen die generierte Thermospannung, die elektrische Ausgangsleistung und der Wirkungsgrad zu.

Da elektrische Energie an Bord meist nur begrenzt über Batterien, ineffizient über motorisch angetriebene Hilfsaggregate (Generatoren) oder durch Landstrom (ca. 0,40 €/kWh [1]) zur Verfügung steht, gewinnt Autarkie zunehmend an Bedeutung.

Ein Hier setzt das ThermoMarE-Projekt an: Ziel ist die Entwicklung autarker Heizsysteme, die ihre elektrische Energie direkt aus der beim Heizbetrieb entstehenden Wärme über einen TEG gewinnen. Solche Systeme können die Abhängigkeit von Batterien, Generatoren und Landstrom erheblich oder vollständig eliminieren. Überschüssige elektrische Energie kann in Batterien gespeichert und bei Bedarf, z. B. zum Start des Brenners, wieder abgerufen werden.

Zielgruppen der Projektentwicklung sind Spezialschiffe wie Arbeits- und Lotsenschiffe, Offshore-Versorger, Yachten, Segelschiffe, Solar- und Windschiffe sowie Binnenschiffe (Abb. 2), die bei Gesamtlängen von bis zu 20 m einen typischen Heizleistungsbedarf um 10 kW aufweisen.

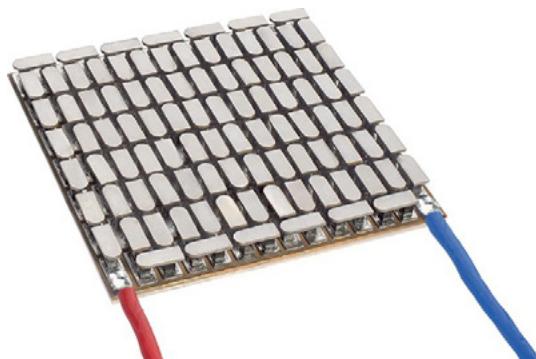


Abb. 1: HalbHeusler-TEM der Isabellenhütte, entnommen aus [2].

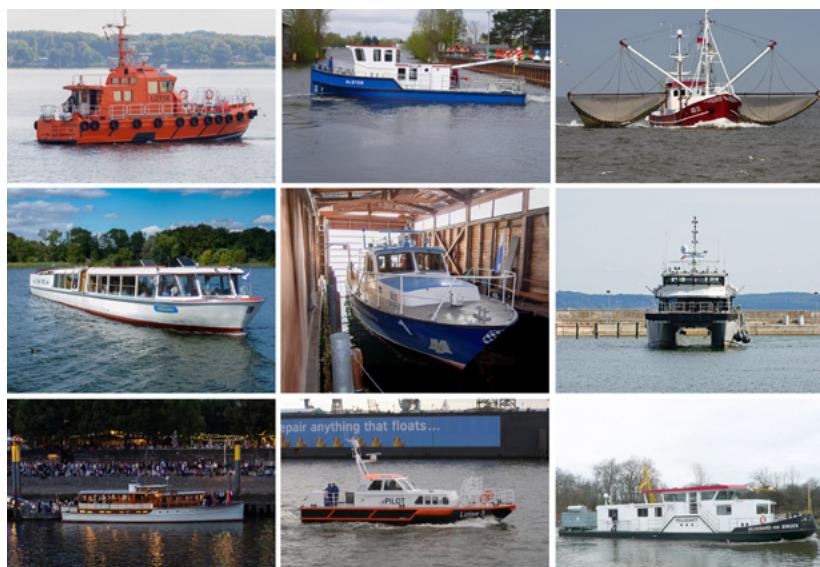


Abb. 2: Schiffstypen, derzeit mit SCHEER-Heizsystemen des energieeffizienten Typs blue efficiency® ausgestattet, für die eine TEG-Integration entwickelt wird.

Im Rahmen des ThermoMarE-Projekts soll ein System entwickelt und erprobt werden, das den elektrischen Eigenbedarf von Heizsystemen dieser Schiffstypen von ca. 100 W [3,4] durch einen integrierten TEG deckt. Ausgangspunkt der Arbeiten ist ein Heizsystem (Typ MARELA®) des Unternehmens Scheer, das mit TEM des Unternehmens Isabellenhütte ausgestattet werden soll.

Zentrales Ziel des ThermoMarE-Projektes ist die Entwicklung eines wirtschaftlich tragfähigen Konzepts zur Heizsystemautarkie mittels TEM sowie die Überführung in die maritime Praxis.

2. Methodik

Verschiedene Integrationsstellen innerhalb des Heizsystems wurden auf ihre Voraussetzungen zur Integration von TEM bewertet. Als Grundlage dienten Rahmenbedingungen des Heizsystems, darunter: Flächenangebot, Leistungsanforderung, Betriebssicherheit, Vorgaben zur Aufrechterhaltung der Stabilität und Effizienz der Verbrennung, sowie wirtschaftliche und technische Betrachtungen verschiedener Materialoptionen für TEM, Wärmetauscher, Verbindungsmaterialien und Dichtsysteme. Ergänzt wurde dies durch eine Anforderungsanalyse für die effiziente Integration der TEM, die benötigte Temperaturen, Wärmestromdichten, geometrische Toleranzen der Wärmetauscher und erforderliche mechanische Anpressdrücke zur Optimierung der thermischen Kopplung berücksichtigte.

Nach Festlegung des Integrationsortes am heißen Klöpperboden (Abb. 4) wurden Messungen an einem modifizierten Klöpperboden durchgeführt, der mit zwölf Typ-N Thermoelementsensoren zur Bestimmung lokaler Temperaturen (Sensor 1 – 12) ausgestattet wurde. Zusätzlich wurden zwei Temperaturfühler zur Messung der Wassertemperatur im Kessel (Sensor 13) sowie an der Abgasführung (Sensor 16) eingesetzt. Ferner wurde ein Prandtl-Staurohr am Abgasauslass eingesetzt um den Abgasdruck (Sensor 14) und den Volumenstrom (Sensor 15) zu messen. Die Messungen wurden bei verschiedenen stationären Sollwerten der Kesseltemperaturen

durchgeführt ($65\text{ }^{\circ}\text{C} - 95\text{ }^{\circ}\text{C}$), um einen repräsentativen Betriebsbereich des Heizsystems abzudecken.

Hiernach erfolgte eine Analyse des Ist-Heizsystems mittels numerischer Strömungssimulation (CFD – Computational Fluid Dynamics). Die experimentell äußert schwer zu bestimmende Gastemperatur nahe der Brennerdüse sowie die Strömungsgeschwindigkeit des Heißgases wurden in CFD-Simulationen variiert, mit dem Ziel Abweichungen zwischen empirischen Messdaten des Heizsystems und simulativen Ergebnissen zu minimieren, sowie belastbare Temperatur- und Wärmestrom-verteilungen als Grundlage für die Auslegung der Wärmetauscher und die Anpassung der TEM zu erhalten.

Mit den so ermittelten Randbedingungen wurden anschließend unterschiedliche Wärmetauscher-bauformen hinsichtlich ihrer Wärmeübertragung zwischen Heißgas und TEM durch weitere CFD-Simulationen bewertet, um thermische Betriebsbedingungen sowie Leistungsprognosen für TEM abzuleiten. Grundlage der Leistungsprognosen waren Messungen an TEM, deren Design an die simulativ ermittelten Randbedingungen und Ergebnisse der Anforderungsanalysen angepasst wurde. Die Ergebnisse der Simulationen wurden in die Konstruktion eines Wärmetauschers mit zweischaligem Klöpperboden überführt, der im Zwischenraum Platz zur Aufnahme von 6 TEM bietet.

Zur experimentellen Untersuchung der im Heizsystem erzeugbaren elektrischen Leistung wurde ein Laborversuchsstand konzipiert und mit dem zweischaligen Klöpperboden aus Aluminium ausgestattet. Die Wahl von Aluminium wird durch CFD-Simulationen gestützt (Abb. 5), die eine maximale Temperatur von 575 K zeigten, wobei später bei Bedarf ein Materialwechsel oder thermische Schutzbeschichtungen zur Temperaturanpassung möglich sind. Der Kaltseitenwärmetauscher wurde zusätzlich mit Kühlrippen zur Verbesserung der Wärmeabfuhr an das Wasser sowie mit Versteifungsrippen zur Minimierung mechanischer Verformungen ausgestattet. Die TEM-Kopplungsflächen beider Schalen wurden mit einer Parallelitäts-toleranz $< 0,1\text{ mm}$ gefertigt. Zur Vermeidung einer Beschädigung

der TEM wurden zur Vorbereitung der Experimente zwei Sätze von Modellkörpern (je sechs TEM-Dummies) aus Inconel 600 hergestellt (Abb. 3). Die Kopplungsflächen aller Dummies entsprechen jenen der TEM ($25 \times 50 \text{ mm}^2$). Die Wärmeübergangskoeffizienten der Dummy-Sätze mit unterschiedlichen Dicken (12,97 mm / 24,45 mm) markieren Extrempunkte möglicher TEM-Auslegungen (500 W/m²K – 950 W/m²K). Jeder Dummy wurde mit erodierten Löchern nahe den Kopplungsflächen zur Aufnahme von Thermoelementen versehen.

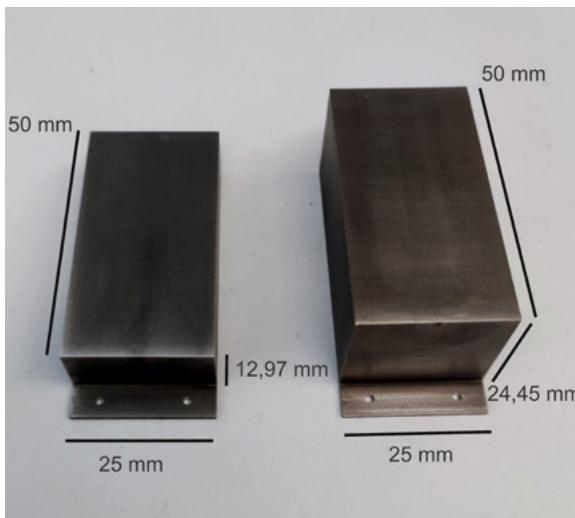


Abb. 3: Zwei verschiedene Ausführungen von TEG-Dummies aus Inconel 600.

Die Dummies ermöglichen die Messung von Temperaturdifferenzen am Installationsort der TEM. Mittels dieser Daten können in Kombination mit den bekannten Wärmeübergangskoeffizienten Wärme-flüsse berechnet und mit den Ergebnissen der CFD-Simulationen abgeglichen werden, wodurch Rückschlüsse auf die Güte der Wärmeübertragung sowie die Qualität der technisch-konstruktiven Umsetzung gezogen werden können.

3. Ergebnisse

3.1 Anforderungsanalyse, Bewertung der Integrationsorte und Analyse des Heizsystems ohne TEM

TEM der Isabellenhütte aus Halb-Heusler-Legierungen benötigen für optimale Ausgangsleistungen hohe Heißseiten-Temperaturen von bis zu 550 °C [2], während die Temperaturen an der Kaltseite 100 °C nicht überschreiten sollten. Alternative TEM auf Basis von Bi_2Te_3 erreichen ihre Maximalleistung bei Heißseiten-Temperaturen bis 250 °C [5]. Zur Minimierung des thermischen Kopplungswiderstands zwischen TEM und Wärmetauscher ist ein mechanischer Anpressdruck von mindestens 2 MPa erforderlich; zur Kompensation von Unebenheiten der involvierten Koppelflächen im Bereich < 200 µm werden die Übergänge mittels Graphitfolien ausgestattet.

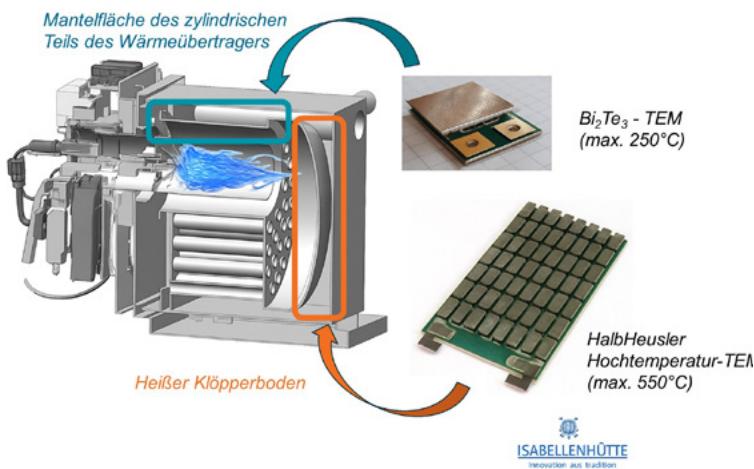


Abb. 4: Schnittansicht durch Brenner und Kessel des Heizsystems mit Angabe bewerteter Installationsorte für TEM aus Bi_2Te_3 und aus HalbHeusler-Legierungen der Isabellenhütte.

Für die Auswahl des Integrationsortes wurden Einbausituationen am heißen Klöpperboden sowie stromab an der Mantelfläche des zylindrischen Wärmeübertragerteils zwischen Brennkammer und Wasserkessel betrachtet (Abb. 4). Aufgrund der Prallstrombedin-

gung am Klöpperboden werden dort maximale Wärmefflusssichten und höchste Temperaturen erwartet, die einen Einsatz von Bi_2Te_3 -TEM nur bedingt zulassen, da ihre Wirtschaftlichkeit und thermische Langzeitstabilität unter den dort herrschenden Bedingungen kritisch bewertet wurde – ein Befund, der durch spätere Messungen am Heizsystem ohne TEM bestätigt wurde (Abb. 5).

Die Analyse der Bedingungen beider Installationsorte unter Berücksichtigung von Leistungsdichten zeigt, dass zur Erreichung einer Gesamtleistung von 100 W etwa 131 Bi_2Te_3 -TEM entlang der Abgasführung erforderlich wären, während am heißen Klöpperboden lediglich sechs HalbHeusler-TEM installiert werden müssten (Tab. 1). Im weiteren Projektverlauf wurde aufgrund der Vorzüge von HalbHeusler-TEM die Integration dieser Module am Klöpperboden verfolgt.

Tab. 1: Ergebnis der Abschätzung zur benötigten Anzahl von TEM für die Erreichung einer elektrischen Ausgangsleistung von 100 W in Abhängigkeit des Installationsortes.

	Installation von Bi_2Te_3-TEM am zylindrischen Teil des Wärmeübertragers	Installation von HalbHeusler-TEM am Klöpperboden
Elektrische Leistungsdichte [W/cm ²]	0,19	1,6
Benötigte Modulfläche [cm ²]	526	63
Thermische Leistungsdichte [W/cm ²]	5,5	39
Benötigte thermische Leistung [kW]	2,9	2,5
Anzahl der TEM []	131	6

Im Rahmen der Anforderungsanalyse für das Heizsystem wurden insbesondere konstruktive und thermische Schnittstellen definiert, um einen zuverlässigen und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Die Verbindung zwischen heißem Klöpperboden (Heißseitenwärmevertrager) und Brennkammer, muss wasserdicht ausgeführt werden um das Eindringen von Medien zu verhindern. Gleichzeitig muss dieser Teil des Klöpperbodens thermisch von der Mantelfläche des zylindrischen Teils des Wärmeübertragers entkoppelt werden, um unerwünschte Wärmeverluste zu minimieren, bzw. den Wärmetransport zu den TEM zu maximieren. Der Heißseitenwärmetauscher ist hierzu über eine Cerablancket-Dichtung thermisch von der Brennkammer isoliert, während drei O-Ring-Dichtungen eine wasser-dichte Verbindung sicherstellen. Die Fixierung der Wärmetauscher erfolgt über kreisförmig angeordnete Schraubverbindungen, in die Keramikbuchsen und -unterlegscheiben integriert sind, um thermische Kurzschlüsse zu minimieren. Federn an den Schraubverbin-dungen gewährleisten einen konstanten Anpressdruck, der über den Federweg ermittelt werden kann, und sichern so die zuverlässige Funktion der Dichtungen und die Effizienz der Wärmeübertragung. Der Zwischenraum im zweischaligen Klöpperboden ist mit einer dreifachen O-Ring-Dichtung gegen das Eindringen von Wasser in den Hohlraum gesichert, um die darin befindlichen TEM vor Kondensat und Leckagen zu schützen. Darüber hinaus erfordert die Verbindung zwischen Heiß- und Kaltseitenwärmetauscher eine wirksame thermische Entkopplung, um den Temperaturgradienten an den TEG zu maximieren (aktuell Isolation über Luft, perspektivisch über Hochleistungsdämmstoff). Zusätzlich darf die Gesamtdicke des Wärmetauschers, bestehend aus dem zweischaligen Klöpperboden, einen Wert von 120 mm nicht überschreiten, um die Installierbarkeit des Heizsystems an Bord der anvisierten Schiffsklassen sicherzustellen.

Messungen der Temperaturverteilung zeigen im Zentrum des modifizierten Klöpperbodens Maximalwerte von 575 K (Abb. 5). Die Temperaturverteilung auf dem gesamten Klöpperboden überstreicht einen Bereich von annähernd 200 K, wobei äußere Bereiche tendenziell die kältesten Zonen darstellen. Der am Gasauslass experimentell ermittelte Volumenstrom von 144,5 m³/h entspricht unter

Berücksichtigung des Rohrdurchmessers ($\varnothing = 35$ mm) am Orte des installierten Prandtl-Staurohres einer Gasaustrittsgeschwindigkeit von 41,7 m/s.

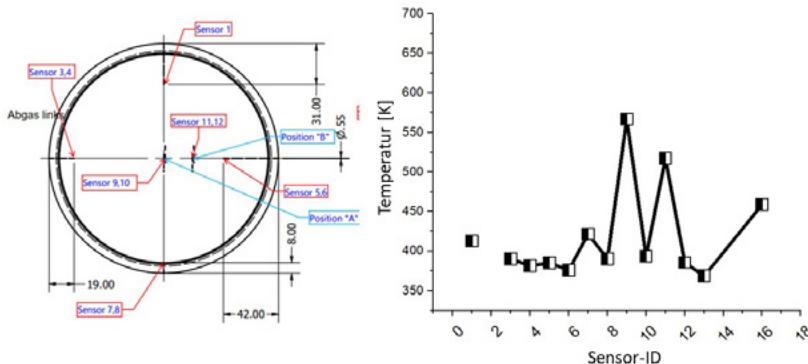


Abb. 5: Positionen der zwölf installierten Thermoelementsensoren im modifizierten Klöpperboden (links) und gemessene Temperaturen (rechts) bei einer Ist-Temperatur des Wasserkessels von 95,55 °C (Sollwert = 95 °C). Sensor 2 konnte aufgrund eines Defekts nicht ausgelesen werden.

Die Gasgeschwindigkeit und die Heißgastemperatur innerhalb der Brennkammer wurden als Randbedingungen der CFD-Simulationen in einem Bereich zwischen 1 m/s - 6 m/s bzw. 900 °C - 1.500 °C variiert. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten der eingesetzten Sensoren ergibt sich die beste Übereinstimmung zwischen numerischen und experimentellen Daten für eine Gaseintrittstemperatur von 1.000 °C sowie für eine Gasentrittsgeschwindigkeit von 5,5 m/s.

Mit Ausnahme der Temperaturen am Randbereich des Klöpperbodens (Sensoren: T1 – T4, T7, T8), welche durch eine thermische Kopplung zwischen Klöpperboden und Mantelfläche beeinflusst werden (aufgrund fehlender Daten zum thermischen Übergangswiderstand dieser Komponenten wurde diese Kopplung in der CFD-Simulation als ideal angenommen), zeigt ein Temperaturvergleich Relativabweichungen von: -0.9 % (T9), +2 % (T10), +3.1 % (T11), +0.35 % (T11), -2.1 % (T5), +1.1 % (T6). Auch ein Vergleich der simulierten und gemessenen Abgastemperatur zeigt eine geringe

Relativabweichung von nur -1.1 % (T16). Durch die erzielte Übereinstimmung zwischen experimentellen Daten und Simulationsergebnissen konnte das CFD-Modell im Rahmen seiner eigenen Unsicherheit ($\pm 20\%$, bezogen auf Wärmeflüsse) validiert werden. Auf Basis dieser Ergebnisse überträgt das Heizsystem ohne TEM eine Gesamtleistung von $13,9 \text{ kW} \pm 2,7 \text{ kW}$ in das Wasser. Hiervon entfallen $2,6 \text{ kW} \pm 0,54 \text{ kW}$ auf die Wärmeübertragung am Klöpperboden.

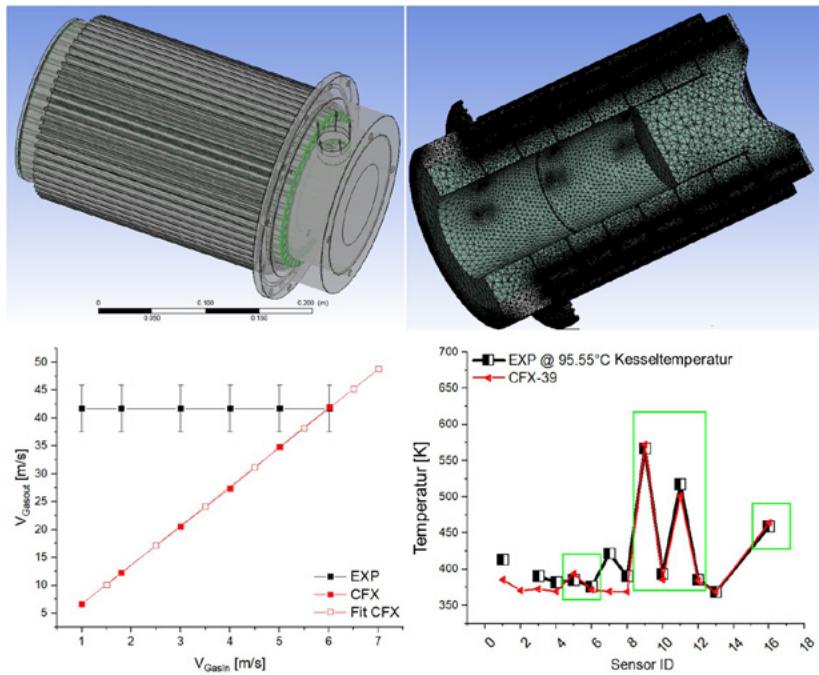


Abb. 6: Dreidimensionales (3D) Geometriemodell des Heizsystems (oben links). Schnittbild durch das vernetzte CFD-Modell mit $30 \cdot 10^6$ Knoten (oben rechts). Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Gasaustrittsgeschwindigkeit (unten links) und Vergleich der Temperaturverteilung im Klöpperboden (unten rechts – grüne Markierung kennzeichneten Temperaturmessstellen, die nicht oder nur geringfügig von einer thermischen Kopplung zwischen Klöpperboden und Mantelfläche beeinflusst werden).

3.2 CFD-Simulationen zur Optimierung des Klöpperbodens und TEM-Leistungsprognose

Sieben Varianten von Oberflächenstrukturierungen des heißen Klöpperbodens wurden mittels CFD-Simulationen untersucht.

Ziel war die Verbesserung der konvektiven Wärmeübertragung aus dem Heißgas durch Oberflächenvergrößerung, ausgehend von der glatten Oberfläche des originalen Klöpperbodens.

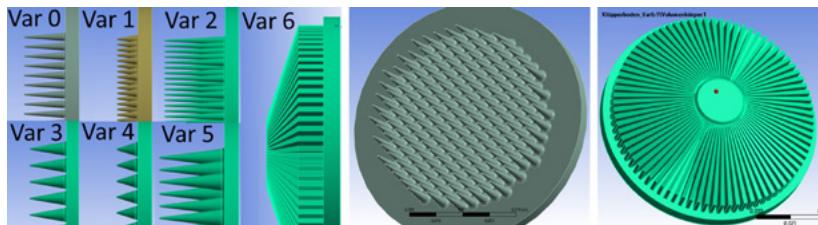


Abb. 7: Sieben Varianten von Oberflächenstrukturen (links) des heißen Klöpperbodens. Varianten Var0 – Var5 beinhalteten unterschiedlich dimensionierte stiftförmige, konisch zulaufende Oberflächenstrukturen (Mitte) während in Var6 eine radiale Anordnung von Rippenstrukturen (rechts) untersuchte wurde.

Für stiftförmige Strukturen steigt die Wärmeabsorption monoton mit der zur Verfügung stehenden Oberfläche des Klöpperbodens (Abb. 8). Stifte mit größeren Basisradien haben bei gleicher Gesamtoberfläche aufgrund eines reduzierten Wärmleitungswiderstandes leichte Vorteile gegenüber dünneren Stiften (vgl. grüne und schwarze Kurven in Abb. 8). Insgesamt kann mit dünneren Stiften jedoch auf der systembedingt limitierten Fläche des Klöpperbodens eine größere Gesamtfläche dargestellt und damit mehr Wärmeleistung aus dem Gas extrahiert werden. VAR2 erzielt mit >1.8 kW und einer Maximaltemperatur von 975 K die höchsten Werte. Im Vergleich zum Heizsystem ohne TEM reduziert sich die Wärmeübertragung am Klöpperboden durch Installation der TEM infolge des zusätzlichen Wärmewiderstandes. Dies kann durch Oberflächenvergrößerung und damit Reduktion des konvektiven Wärmewiderstandes mit den hier betrachteten Varianten nicht kompensiert werden.

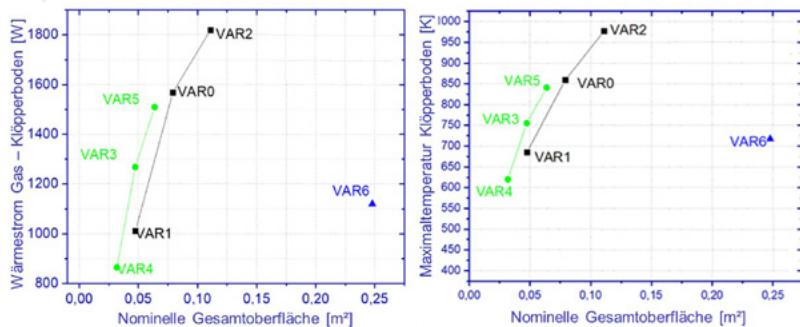


Abb. 8: Simulierter Wärmeeintrag (links) und maximale Oberflächentemperatur (rechts) in Abhängigkeit der nominellen Gesamtoberfläche des Klöpperbodens für sieben Oberflächenstrukturvarianten.

VAR6 erzielt trotz größter Oberfläche nur relativ geringe Werte bei Wärmeextraktion und Maximaltemperatur. Analysen zeigen, dass der Abstand der Rippenstrukturen zu dicht gewählt wurde, wodurch die heiße Gasströmung aufgrund des hohen Strömungswiderstandes nicht tief genug in die Zwischenräume eindringen kann und damit große Teile der nominellen Fläche nicht effektiv zur Wärmeextraktion beitragen können (Abb. 9).

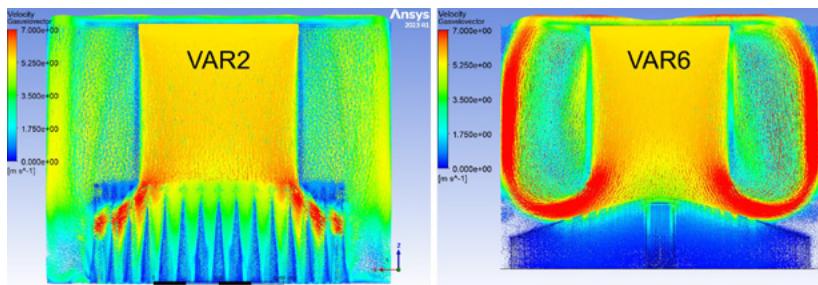


Abb. 9: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeit für VAR2 (links) und VAR6 (rechts).

Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit der TEM unter Betriebsbedingungen des Heizsystems wurden angepasste HalbHeusler-TEM aufgebaut und in einem Thermogeneratorprüfstand charakterisiert (Abb. 10). Die Messergebnisse von zwei bzw. vier aufeinanderfol-

genden Temperaturzyklen an zwei unterschiedlichen TEM bei Heißseitentemperaturen von bis zu 500 °C bestätigen die geringe Varianz und gute Stabilität der Module sowie Ausgangsleistungen von über 19 W pro Modul. Dies entspräche bei sechs installierten TEM einer Gesamtleistung von 114 W und unterstreicht das Potenzial zur Erreichung der Zielmarke von 100 W im Heizsystem.

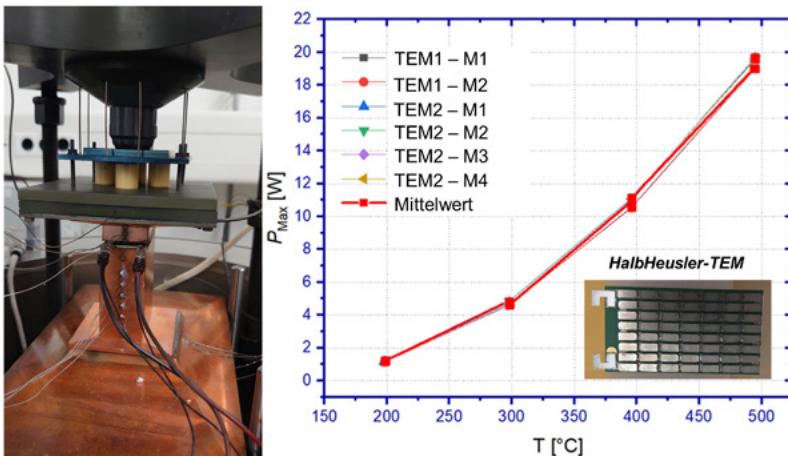


Abb. 10: Messaufbau im Thermogenerator-Prüfstand (links) und ermittelte Maximalleistung der HalbHeusler-TEM (rechts).

3.3 Ergebnisse experimenteller Untersuchung des Heizsystems mit TEM-Dummies am Laborversuchsstand

Insgesamt wurden vier Versuchsreihen (V1-V4) am Laborversuchsstand (Abb. 11, Abb. 12) mit einem 10 kW-Brenner und Kessel sowie mit TEM-Dummies durchgeführt. Hierbei wurden Anpressdruck und Dummies variiert und im letzten Versuch die Wassertemperatur im Kessel abgesenkt (Tab. 2). Ziel war der Nachweis thermischer Bedingungen aus der Anforderungsanalyse, insbesondere die Einhaltung der maximal zulässigen TEM-Kaltseitentemperatur (100 °C) als Vorbereitung für Tests mit echten TEM.

Tab. 2: Überblick zu Parametern und Temperaturmessdaten der Versuchsreihen (V1-V4) am Laborprüfstand

Versuch	Anpressdruck [MPa]	Wassertemperatur [°C]	Dicke Dummy [mm]
V1	2	65	12,97
V2	0,8	65	12,97
V3	2	65	24,45
V4	2	20	24,45
Heißseitentemperatur [°C] Bereich / Ø	Kaltseitentemperatur [°C] Bereich / Ø	Mittlere Temperaturdifferenz [K]	
203-245/223	118-223/153	70	
136-231/196	93-146/119	77	
184-257/217	90-131/105	112	
163-236/196	59-101/75	121	

V1 zeigte unerwartet niedrige Heißseitentemperaturen und zu hohe Kaltseitentemperaturen. In V2 wurde der Anpressdruck verringert, um einer Wölbung des Kaltseitenwärmetauschers als mögliche Ursache für die zu hohen Kaltseitentemperaturen entgegenzuwirken. Die Druckabsenkung verringerte die Temperaturen sämtlicher Messstellen auf der Kaltseite signifikant; jedoch nicht ausreichend. Im Mittel fielen die Temperaturen an der kalten Seite stärker als auf der heißen Seite (mittlere Temperaturdifferenz stieg gegenüber V1 um 10%). Zur weiteren Absenkung der Kaltseitentemperatur wurden in V3 dickere Dummies eingesetzt, deren höherer Wärmewiderstand (geringerer Wärmestrom) zu einen reduzierten Temperatursprung an Kaltseitenkopplung und damit eine Annäherung der Kaltseitentemperaturen an die Wassertemperatur erwarten ließ. Die Kaltseitentemperaturen sanken gegenüber V2 nochmals ab. In V4 wurde aus diesem Grund die Wassertemperatur auf 20 °C gesenkt. Eine solche Kesseltemperatur ist im Heizbetrieb nicht üblich und sollte lediglich den Nachweis einer ausreichend niedrigen Kaltseitentempe-

ratur erbringen, um folgende Tests mit echten TEM zu ermöglichen. Im Mittel konnte in V4 die Kaltseitentemperatur auf 75 °C gesenkt werden. Einzelne Messstellen weisen jedoch immer noch zu hohe Temperaturen für den Einsatz von TEM auf.



Abb. 11: Laborversuchsstand ThermoMarE mit Heizgerät (rechts), Wärmetauscher zur Abgabe der Wärme an die Umgebung (links) sowie Steuerungs- und Messtechnik.



Abb. 12: Kalte Schale des Klöpperbodens mit TEM-Dummies (links), Signaldurchführungen der Sensoren und Schraubenverbindungen zur Einstellung des Anpressdruckes (Mitte), heiße Schale mit Stiftstruktur zur Wärmeabsorption (rechts).

Die Temperaturen aller Versuchsreihen bleiben gegenüber den Vorhersagen der CFD-Simulationen weit zurück. Ausgehend von den Temperaturmessdaten der TEM-Dummies aus dem ersten Versuch (Wassertemperatur = 65 °C) wurden Wärmeströme für jeden Dummy berechnet. Hiernach summiert sich der Wärmestrom durch fünf Dummies (Sensor 2 defekt) auf einen Wert von 350 W und bleibt damit ebenfalls hinter den Erwartungen zurück.

Durch eine Versuchsserie am Thermogeneratorprüfstand wurde der flächenbezogene thermische Kopplungswiderstand der Graphitfolie temperatur- und druckabhängig als Vergleichswert bestimmt (Abb. 13). Der Vergleich mit den berechneten thermischen Kopplungswiderständen aus den Messungen am Laborversuchsstand des Heizsystems und den Daten des Thermogeneratorprüfstands zeigt, dass der thermische Übergangswiderstand innerhalb des Heizsystems ca. 10-fach höher liegt als unter vergleichbaren Bedingungen des Thermogeneratorprüfstandes.

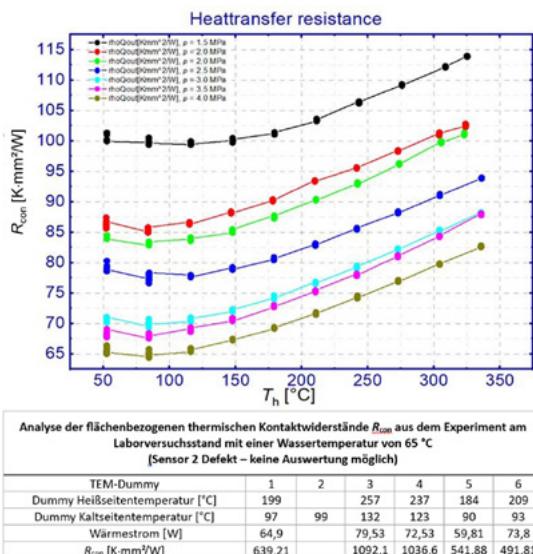


Abb. 13: Messergebnisse des Thermogeneratorprüfstandes zum flächenbezogenen thermischen Kopplungswiderstand der Graphitfolie in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene mechanische Anpressdrücke (oben) und Analyseergebnisse des Experiments am Laborprüfstand des Heizsystems mit Auswertung von Wärmeflüssen durch die TEM-Dummies und den thermischen Kopplungswiderständen zum Kaltseitenwärmeübertrager – kalte Schale des Klöpperbodens (unten).

Der zweischalige Klöpperboden wurde daraufhin demontiert. Es wurde festgestellt, dass sich die TEM-Dummies wie auch die Graphitfolien verschoben hatten, was die schlechten Ergebnisse der Versuche an dem Prüfstand des Heizsystems erklärt. Die kalte

Schale des Klöpperbodens hatte sich trotz Versteifungsrippen mechanisch verformt, was sich durch einen mit einer Lehre feststellbaren Luftspalt zeigte (Abb. 14).



Abb. 14: Nach Demontage des Klöpperbodens wurde eine Wölbung der kalten Schale festgestellt.

4. Gesamtbewertung und Ausblick

Im Rahmen des ThermoMarE-Projekts wurde ein Laborversuchsstand zur Untersuchung der TEM-Integration in maritime Heizsysteme entwickelt und in Betrieb genommen. HalbHeusler-TEM wurden auf die Betriebsbedingungen des Heizsystems angepasst, hergestellt und charakterisiert. Mit repräsentativen TEM-Dummies konnte die grundlegende Funktionsfähigkeit bestätigt und ein technologischer Reifegrad TRL 4 erreicht werden.

Resultate von CFD-Simulationen zeigen in Verbindung mit Messergebnissen, die im Thermogeneratorprüfstand an HalbHeulser-TEM ermittelt wurden, dass das Heizsystem prinzipiell autark betrieben werden kann. Nach diesen Untersuchungen sollte bei einer Wärmeeinkopplung von etwas über 1.8 kW eine elektrische Ausgangsleistung um 100 W durch Installation von sechs HalbHeusler-TEM am Klöpperboden erzielt werden können.

Die experimentellen Ergebnisse am Laborversuchsstand zeigen, dass die Temperaturgradienten über den TEG-Dummies aktuell nicht ausreichen, um die angestrebte elektrische Leistungsabgabe zu erzielen. Die Werte für Wärmeströme und Temperaturen liegen deutlich unter den Erwartungen. Ferner können echte Halb-Heusler-TEM derzeit nicht im Heizsystem getestet werden, da die Kaltseitentemperaturen zu hoch und nahe den maximal zulässigen Werten liegen. Aus Ursache zeigte sich eine Verformung des Kaltseitenwärmetauschers. Die thermischen Kopplungswiderstände liegen um den Faktor 10 höher, als dies für Graphitfolien erwartet werden kann.

Für die Realisierung des Autarkieziels müssen Materialwahl, Konstruktion und Auslegung der Komponenten weiter optimiert werden, um Temperaturgradienten zu erhöhen, thermische Kopplungswiderstände zu reduzieren und die strukturelle Steifigkeit zu verbessern.

Literatur

[1] Landstrompreise der Stadtwerke Duisburg, https://www.stadtwerke-duisburg.de/geschaeftkunden/energiedienstleistungen/landstrom/landstrom-english-version?utm_source=chatgpt.com, aufgerufen 20.10.2025

[2] Datenblatt des HalbHeusler TEM des Herstellers Isabellenhütte GmbH & Co. KG, <https://www.isabellenhuette.com/hubfs/Files/Data-sheets/LE/Thermogenerator.pdf>, aufgerufen am 17.10.2025

[3] Datenblatt des Heizsystems nano des Herstellers SCHEER Heizsysteme & Produktionstechnik GmbH, https://scheer-heizsysteme.de/upload/Upload/downloads/mobile_nano_anleitung_de.pdf, aufgerufen am 20.10.2025

[4] Datenblatt der Pumpe UPM3 Auto 25-50 180 ZZZ des Herstellers Grundfos GmbH, <https://product-selection.grundfos.com/de/products/upm3-upm4-oem/upm3-auto-oem/upm3-auto-59C93503?pumpsystemid=2726647529&tab=variant-specifications>, aufgerufen am 20.10.2025

[5] P. Ziolkowski et al. Validation of commercial Bi₂Te₃-based thermoelectric generator modules for application as metrological reference samples. Measurement 2021, Vol. 177, 109247, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109247>

03SX565

SKALa

Systematische Lösungsansätze zur optimalen Korrosionsschutzwirkung von Anstrichsystemen an besonders beanspruchten maritimen Strukturen Schiff- und Offshore relevanten Bauteilen

Autorenliste

Muehlhan Holding Service GmbH

Dr.-Ing. Tom Marquardt

Fraunhofer IFAM

Dr. rer. Nat Thomas Lukaszcyk

Sascha Buchbach

Sherwin Williams Coatings

Johannes Viertel

Clean-Lasersystems GmbH

Veronika Katzy

Hermann GmbH

Jürgen Graßl



1. Einleitung und Ziele des Vorhabens

Organische Korrosionsschutzsysteme in Schiffen und stationären maritimen Bauwerken, wie beispielsweise Schleusen, Offshore-Windenergieanlagen oder Transformatorenplattformen, versagen bevorzugt an mechanisch hoch beanspruchten Teilen der Konstruktion, insbesondere an Schweißnähten und in Übergangsbereichen mit wechselnder Beschichtungsdicke. Ein Beschichtungsabbau über Schweißnaht ist in Abbildung 1 dargestellt. Daher tritt in diesen Bereichen auch bevorzugt Korrosion auf. Die Beseitigung der Korrosionsschäden und das Neubeschichten der Nähte sind zeit- und kostenaufwändig.



Abb. 1: Beschichtungsschäden und Korrosion an lokal beanspruchten Konstruktions-elementen in Ballasttanks, links, und an einer Offshore-Struktur, rechts (Copyright: Muehlhan AG, Hamburg)

Die Gründe für das bevorzugte Versagen an Schweißnähten sind nicht eindeutig bekannt. Im damaligen geförderten Verbundvorhaben BeKas, in dem eine vergleichbare Aufgabenstellung bearbeitet wurde, konnte nachgewiesen werden, dass das Beschichtungsversagen an freien Kanten und der damit einhergehenden Korrosion von einer Vielzahl geometrischer, verfahrenstechnischer und beanspruchungsrelevanter Kennwerte abhängt (2; 3; 4). Diese generelle Situation kann auch für die Korrosion von Schweißnähten übertragen werden.

Insbesondere ist davon auszugehen, dass der Beschichtungsstoff aufgrund seiner begrenzten Dehnfähigkeit lokal auftretenden mechanischen Verformungen nicht folgen kann (1). Aufgrund der

über Schweißnähten oft modifizierten Untergrundqualität ist die Möglichkeit der Aufnahme von Spannungen in der Verbundfuge bzw. in der Grenzfläche Untergrund-Beschichtung ebenfalls begrenzt (5).

Besonders ungünstig wirken sich aus der Fertigung resultierende Eigenspannungen aus, die im Bereich von Schweißnähten in Höhe der Werkstoffstreckgrenze liegen können. (6) Bei den ersten Betriebsbelastungen findet hier ein shake down mit hohen plastischen Dehnungen statt, bei denen die Eigenspannungen abgebaut bzw. umgelagert werden.

Die Beschichtungen reißen und an den Rissen wird der Beschichtungsabbau initiiert. Es kann daher angenommen werden, dass die Korrosionsschutzwirkung gedehnter Beschichtungsstoffe reduziert ist. (7) Quellvorgänge im Beschichtungsstoff, die zu Spannungen und ggfs. sogar Rissen führen, sind gerade bei großen Schichtdicken zu beobachten. Es wäre daher denkbar, dass speziell projektierte Beschichtungsstoffe mit erhöhtem Dehnungsvermögen der Beanspruchung wesentlich besser widerstehen und einen längeren Schutz der entsprechenden Konstruktionselemente gewährleisten (8; 9; 10).

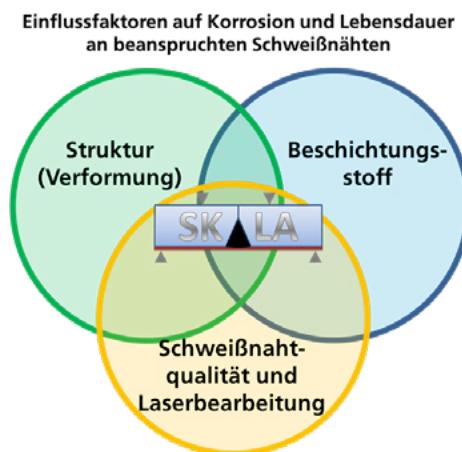


Abb. 2: Einflüsse und Wechselwirkungen auf die Lebensdauer von Beschichtungen über Schweißnähten

Weiterhin wird das Versagen von Korrosionsschutzsystemen auf Schweißnähten vielfach auf eine schlechte Haftfestigkeit der Systeme auf den Schweißnähten zurückgeführt, weshalb sowohl im Schiffbau als auch für Offshore-Windkonstruktionen z.T. hohe Vorbereitungsgrade der Nähte vor dem Beschichten vorgeschrieben werden. Der vielfach vorgeschriebene Grad „P3“ verlangt u. a. (11):

- vollständiges Entfernen von Schweißspritzern, -schlacken und Randkerben,
- Glattschleifen der Nahtoberfläche,
- Ausschleifen und Auffüllen von Poren und von Endkratern.

Die Erfüllung dieser Kriterien ist arbeits- und kostenintensiv, da es sich um manuelle Tätigkeiten handelt. Es ist bisher jedoch nicht nachgewiesen, ob die Untergrundvorbereitung die primäre Quelle für das Versagen von Korrosionsschutzbeschichtungen an Schweißnähten ist.

Auch sind die Einflüsse der im Stand der Technik genutzten bzw. der alternativ möglichen Vorbehandlungsverfahren für die Schweißnahtvorbereitung nicht ausreichend verstanden.

Das Projekt SKALA verfolgte die folgenden Ziele

- Ein Ziel des Projektes war es, die genannten Effekte eindeutig und statistisch abgesichert nachzuweisen und realistische, fachlich fundierte Vorgaben für die Untergrundqualität zu erarbeiten. Insbesondere sollen Voraussetzungen für die Harmonisierung und Vereinfachung bestehender Vorschriften geschaffen werden.
- Ein weiteres Ziel bestand in der Reduktion des Aufwandes zur Schweißnahtnachbehandlung auf der Basis der Entwicklung von automatisierbaren Laserverfahren, zur Nachbearbeitung von Schweißnähten.

- Ebenso war die Entwicklung eines verformbaren, schweißnaht-toleranten Beschichtungssystems mit der Validierung der für die Applikation notwendigen Geräte- und Verfahrenstechnik.

2. Stand der Technik

Beschichtungen stellen eine wichtige und meist alternativlose Form des Korrosionsschutzes von Stahlstrukturen in maritimer Umgebung dar. Die Schutzfunktion kann auf die Aspekte Barrierefunktion, Adhäsion und aktive Beeinflussung der Metallauflösung unterteilt werden. Die Interaktion zwischen diesen Aspekten ist zwar ein wesentliches Merkmal guter Schutzbeschichtungen; versagt eine Beschichtung jedoch hinsichtlich einer Schutzfunktion, so können die anderen dies meist nicht vollständig kompensieren. Idealerweise sind also Beschichtungssysteme so auszuführen, dafür die gesamte zu schützende Fläche die Barrierefunktion möglichst lange vollständig erhalten bleibt. Während es durch eine gute Qualitätskontrolle unproblematisch ist, dies für ebene Flächen sicherzustellen, stellen andere Oberflächenbereiche (Ungänzen) wie Kanten, Schweißnähte etc. immer noch große Probleme dar. Die Effekte, die einer guten Barrierefunktion der Beschichtung entgegenstehen, sind hier sehr vielfältig.

Bekannt ist die sog. „Kantenflucht“, bei der aufgrund der Oberflächenspannung des flüssig aufgetragenen Beschichtungsstoffes an scharfen Kanten eine Schichtdickenreduzierung auftritt, die so weit gehen kann, dass die Kante freiliegt. Dies wird in technischen Richtlinien insofern berücksichtigt, dass ein Abrunden, mindestens ein mehrfaches „Brechen“ der Kante gefordert wird [6].

So konnte anhand elektrochemischer Impedanzmessungen an Kanten gezeigt werden, dass das Schichtversagen durch plötzliche Rissbildung entsteht und somit mechanischer Natur ist. Dies muss nicht zwingend an der Stelle geringster Schichtdicke passieren, sondern dort wo sich aufgrund ungünstiger geometrischer Gegebenheiten die intrinsischen Spannungen „aufkonzentrieren“.

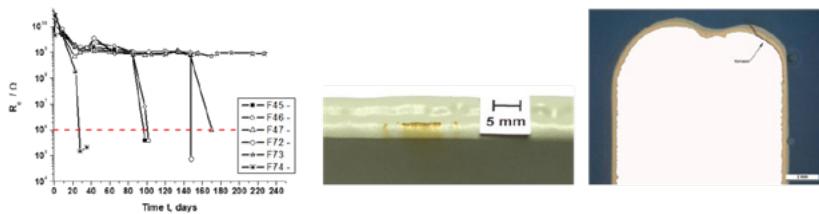


Abb. 3: Elektrochemischer Nachweis der mechanischen Natur des Schichtversagen an Kanten, Ergebnisse aus „Bekas“

Der gleiche Mechanismus kann dem Schichtversagen an Schweißnähten zugrunde gelegt werden. Hier kommt jedoch erschwerend hinzu, dass Schweißnähte auch extrinsischen Spannungen ausgesetzt sind, die von der Struktur auf die Beschichtung übertragen und deren Festigkeit überschreiten können. Risse werden hier immer längs der Kante beobachtet, orthogonal dazu können aber keine nennenswerten extrinsischen Spannungen auftreten.

Laser-Schweißverfahren haben sich in vielen Branchen als Standard etabliert. Dagegen ist die Anwendung von milden Laser-Reinigungsprozessen zur Verbesserung der Oberflächengüte und Qualität von Schweißnähten bisher nur in bestimmten Anwendungsbereichen untersucht. Gut etabliert ist die Anwendung von Vorbehandlungslasern zur Reinigung der zu schweißenden Fügeteilflächen, z. B. im Automobilbereich.

Anwendungen und Untersuchungen zur Oberflächennachbehandlung einer Schweißnaht mittels Laser sind schwerpunktmäßig im Zusammenhang mit einer Reinigung bekannt. So werben Hersteller und Betreiber von Lasersystemen mit der Möglichkeit zur Entfernung von Oxidations- (Anlauffarben) und Verschmutzungserscheinungen, wie z. B. Schlackeresten [10, 11].

Die Oberflächennachbehandlung von Schweißnähten mittels Laser für die nachfolgende Applikation einer Korrosionsschutzbeschichtung ist bisher nur in bilateralen Machbarkeitsstudien und für Anwendungsfelder mit vergleichsweise geringer korrosiver Be-

anspruchung getestet worden. Für Bereiche mit einer hohen korrosiven Beanspruchung, wie für Offshore-Anwendungen sowie im Schiffsbau gefordert, sind keine Untersuchungen verfügbar. Auch für die Laservorbereitung der angrenzenden Stahl-Fügeteilloberflächen für Korrosionsschutzbeschichtungen im maritimen Bereich sind bisher kaum Untersuchungen bekannt. Diese konzentrieren sich auf die Reparatur von korrosiv vorbelasteten Bauteilen. Auch wurde im Rahmen der Untersuchungen keine genauere Bewertung der Zusammenhänge zwischen den verwendeten Laserparametern, der erzeugten Oberflächenzustände sowie der resultierenden Beschichtungshaftfestigkeit entwickelt.

Im Rahmen von Voruntersuchungen konnte zudem gezeigt werden, dass die Laserbehandlung von Stahl-Schweißnähten neben der Reinigung und Vorbehandlung auch zur Öffnung von abgedeckten Poren führen kann (siehe Abbildung 2). Derartige Poren können bei Fehlern in Schweißprozessen entstehen und sich negativ auf die lokale Beständigkeit einer Korrosionsschutzbeschichtung auswirken.

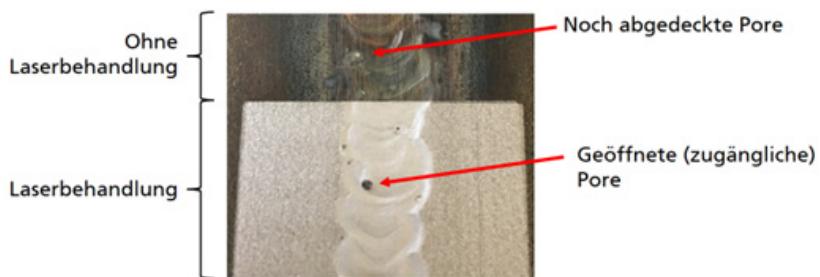


Abb. 4: Stahl-Schweißnaht mit Poren vor bzw. nach Laserbehandlung mit einem gepulsten IR-Laser

Das Konzept zur Entwicklung von selbstheilenden Beschichtungen kann grob in zwei Bereiche unterteilt werden – die intrinsische Selbstheilung und die extrinsische Selbstheilung.

Extrinsische Selbstheilung

Eine Möglichkeit, die Schutzwirkung von Beschichtungen signifikant zu verlängern besteht in dem Einsatz von Mikrokapseln, die bei der Entwicklung von Rissen im Lack aufgebrochen werden und dann ihren Inhalt freisetzen (siehe Schema in Abb. 3).

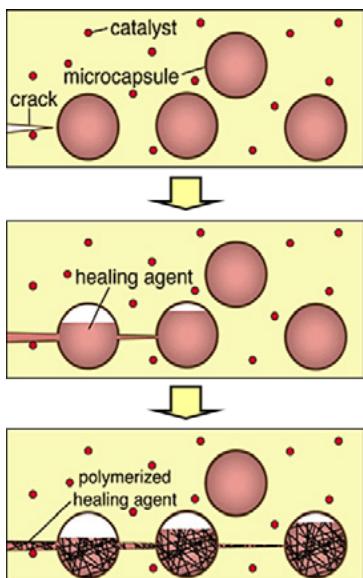


Abb. 5: Schema der Funktionsweise von Mikrokapseln in Schutzbeschichtungen

Speziell für die Beschichtung von besonders korrosionsgefährdeten Bereichen in Ballastwassertanks von Schiffen (freie Kanten und Schweißnähte) wurden im Rahmen des EU-geförderten Projekts THROUGHLIFE (FP 7, ID 265831) erste grundlegende Versuche zum Einsatz dieser Technologie durchgeführt. Hier wurden die Mikrokapseln mit einer Kombination aus einem härtenden Harz und einem organischen Korrosionsinhibitor gefüllt.



Abb. 6: Lackierte Stahlproben mit mikrokapselhaltigem Lack in Ballastwassertank einer Fähre

Intrinsische Selbstheilung

Eine weitere Möglichkeit der Selbstheilung ist die intrinsische Selbstheilung. Das Verfahren zielt darauf ab sehr feine Kratzer und Mikrorisse auszugleichen, welche z. B. auf Autodecklacken durch z. B. Bürsten einer Waschstraße hervorgerufen werden. Beim Überschreiten dieses Glasübergangstemperaturbereichs durch thermische Energie, wie Sonneneinstrahlung, wird die Beweglichkeit des Polymernetzwerks erhöht, sodass das Polymer in einen viskoelastischen Zustand übergehen kann. Durch die Erweichung des Materials können kleine Deformationen und feine Kratzer verfließen.

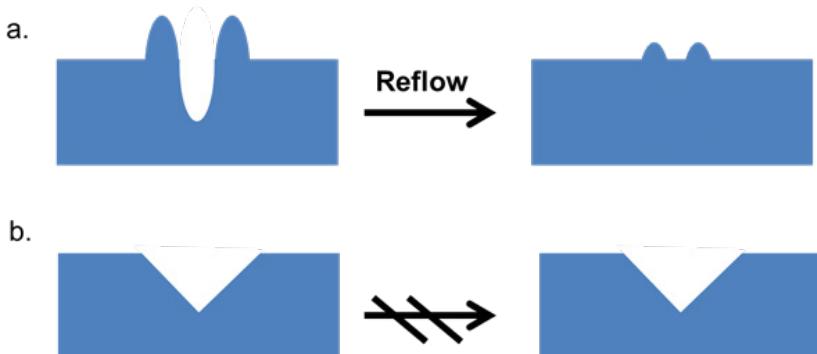


Abb. 7: a) Viskoelastisches Verfließen („Reflow-Effekt“) von kleinen plastischen Deformationen bei Temperaturerhöhung b) große Kratzer mit Materialabtrag lassen sich durch den Reflow-Effekt nicht verschließen

Nachteil dieses Konzeptes ist, dass nur sehr feine oberflächliche Deformationen des Lackes wiederhergestellt werden können. Beschädigungen, die in die Tiefe gehen und zu Materialabtrag führen, können durch den Reflow-Effekt nicht ausgeglichen werden, sondern erfordern den Einsatz neuartiger selbstheilender Beschichtungen.

3. Projektergebnisse

Lackentwicklung

Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, dass der Selbstheilungsprozess an einer Schweißnaht durch eine extrinsische Selbstheilung möglich ist. Die Abbildung 8 zeigt das Wirkprinzip des Heilungsreagenzien.

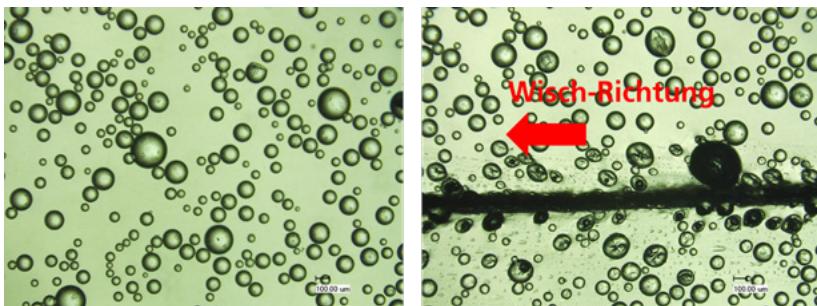


Abb. 8: Leinölverkapselung im Film, 2:1; Ausführung eines Skalpellschnittes

In Langzeitkorrosionsprüfungen nach DIN EN ISO 9227 konnte nachgewiesen werden, dass bei Zugabe von 10 bis 15 % inhibierten Kapseln die Korrosionsschutzwirkung am besten war.

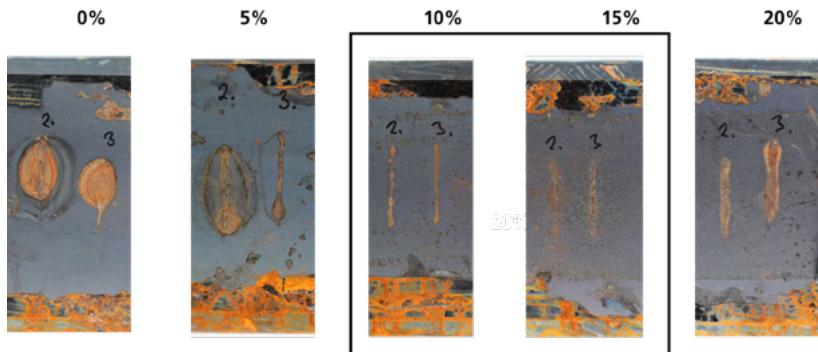


Abb. 9: Auswertung Einflüsse und Wechselwirkungen auf die Lebensdauer (Schutzwirkung) von Beschichtungen über Schweißnähten

Ebenso sollte ebenfalls der intrinsische Selbstheilungsansatz untersucht werden. Die Selbstheilung erfolgt durch reversible Bindungen. Am IFAM wurde das UDETA-System in mehreren Projekten erfolgreich getestet und der Heilungsprozess erfolgt durch Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit.

Das UDETA ist kompatibel mit der Stammkomponente des Lacksystems und die Haftfestigkeit durch Gitterschnittprüfung ist gegeben. Die nachfolgende Abbildung zeigt den optimalen Heilungsverlauf bei erhöhter Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit.

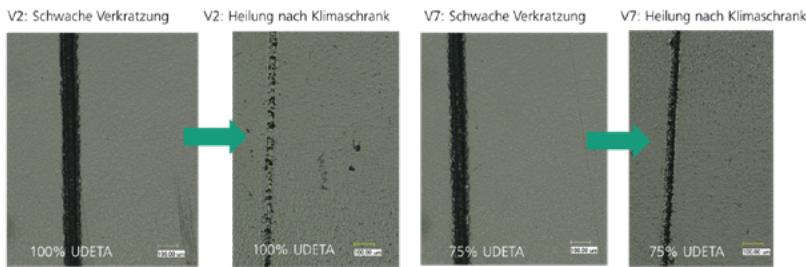


Abb. 10: Heilungsverlauf bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Bei 100%igen Austausch des Härteranteils durch UDETA ist der Selbstheilungseffekt am größten.

Sherwin Williams hat in ihrer Entwicklung bestehende Lacksysteme so modifiziert, dass die Beschichtungen deutlich elastischer eingestellt wurden, und eine andere Vorgehensweise war es die Beschichtung mechanisch gegenüber Impacts beständiger zu machen. Die Korosionsschutzwirkung wurde ebenso deutlich verbessert und die Standzeiten im Zyklustest waren über 4200 Stunden.

Laservorbereitung

Für die Oberflächenvorbereitung der Schweißnähte mittels Laser wurden kommerzielle Strahlquellen mit unterschiedlichen Energieverteilungen im Spot getestet. Während Laser mit einem Gauss-Profil in der Energieverteilung stark abtragend sind und gleichzeitig für eine Aufrauhung genutzt werden können, sind Laser mit einem Flat-Top-Profil für einen schonenden Abtrag bzw. eine Glättung gut geeignet (vgl. Abbildung 11).

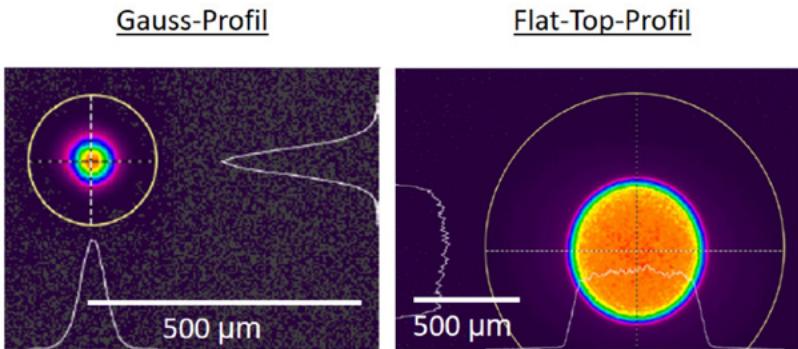


Abb. 11: Energieverteilung eines Laser mit einem Gauss-Profil (links) und einem Flat-Top-Profil

Vorversuche im Labormaßstab mit beiden Laserquellen erfolgten unter Verwendung einer 2D-Scanoptik, um möglichst reproduzierbare Behandlungsbedingungen zu erreichen. Basierend auf diesen Tests zur Bewertung der Behandlungseffekte an den Schweißnaht-

oberflächen wurden verschiedene Laser-Parametersätze entwickelt, welche zusätzlich zu einer Mikrostrukturierung zur Verbesserung der Lackadhäsion führen sollten (Tabelle 1). Abbildung 12 zeigt Mikroskopie-Aufnahmen entsprechend behandelter Schweißnähte. Gut erkennbar sind die unterschiedlichen Ausprägungen der Mikrostrukturierungen des Gauss-Profil-Lasers gegenüber dem Top-Hat-Laser. Bei allen gezeigten Laserprozessen wurden Schweißnahtfehler deutlich reduziert bzw. komplett entfernt. Die Riffelung der Schweißnaht lag in stark abgerundeter Form vor, entsprechend P2 nach ISO 8501-3. Während sie durch die Verwendung eines Gauss-Profil-Lasers deutlich reduziert wurde, war sie nach der Behandlung mit dem Flat-Top Laser nach wie vor gut erkennbar. Besonders stark waren diese Effekte bei Laserparametersatz 42 ausgeprägt, weniger stark bei Laser 40 und Laser 41. Bei allen Probenstellen waren jedoch noch geringe Schlackereste an den Seiten der Schweißnaht erkennbar, welche sich aufgrund des festen Auf treffwinkels bei der verwendeten statischen Optik in Gänze nicht entfernen ließen. Versuche mit einer handgeführten Optik beim Projektpartner Clean-Lasertechnik lieferten dahingehend bessere Ergebnisse.

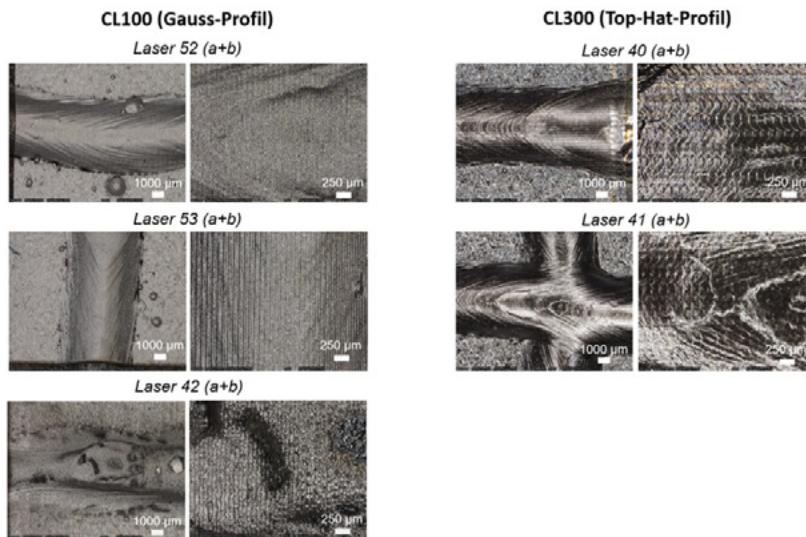


Abb. 12: Mikroskopische Charakterisierung ausgewählter Laser-Parametersätze

Mittels eines Laserkonfokalmikroskops wurden Topographieaufnahmen der laserbehandelten Schweißnähte erstellt und daraus Rauheitswerte bestimmt, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind. Aufgrund der noch deutlich zu erkennenden, originären Riffelung der Schweißnähte nach der Behandlung mit dem Flat-Top Laser sind die entsprechenden Werte allerdings nur bedingt sinnvoll und werden weiter nicht betrachtet (gekennzeichnet mit einem „*“). Die mit dem Gauss-Profil Laser erzeugten Oberflächentopographien weißen je nach Gesamtenergieeintrag unterschiedlich hohe Rauheitswerte auf. Besonders stark ausgeprägt ist die Oberflächentopographie nach der Behandlung mit Laser 42, bei dem eine starke Materialumformung erreicht wurde (Bearbeitung im „Point Modus“).

Tab. 1: Laserparameter und Rauheitswerte für verschiedene behandelte Oberflächen. Die Laserbehandlungen bestehen jeweils aus zwei Schritten, wobei im ersten Schritt (a) die Topographie erzeugt wird und im zweiten Schritt (b) mögliche Anlauffarben entfernt werden.

Param.	Schritt	Frequenz	Leistung
Laser 40* (Top-Hat)	a	16	100
	b	40	100
Laser 41* (Top-Hat)	a	16	100
	b	40	100
Laser 52 (Gauss)	a	150	100
	b	200	100
Laser 53 (Gauss)	a	150	100
	b	200	100
Laser 42 (Gauss)	a	100	100
	b	200	100

Um die Eigenschaften der laserbehandelten Oberflächen hinsichtlich Lackadhäsion und Unterwanderungsbeständigkeit unter korrosiver Belastung bewerten zu können, wurde eine Auslagerung im neutralen Salzsprühtest genutzt. Als Proben dienten Stahlbleche mit drei Schweißnahtpositionen. Die Laserbehandlung mit den jeweiligen Parametersätzen wurde vollflächig ausgeführt. Die Schweißnähte wurden gezielt mit einer Vielzahl von Poren und Schlacke-resten erzeugt. Die Schlackereste wurden durch den Laserprozess weitestgehend entfernt und die Poren wurden geöffnet. Die Proben wurden nach der Laserbearbeitung mit dem Reparatursystem von Sherwin Williams beschichtet. Als Referenz diente eine gestrahlte Oberfläche. Nach dem Aushärten des Lacks wurden über die Stumpfnaht zwei Ritze in die Oberflächen eingebracht, um die Unterwanderungsbeständigkeit zu prüfen. Die Proben nach 1000 Stunden im neutralen Salzsprühtest sind in Abbildung 13 dargestellt.

Wiederhol.	Überlapp	S_a [µm]	S_z [µm]
16	70/50	5,15	68,38
1	50/50		
8	70/70	4,78	83,45
1	50/50		
6	70/70	3,04	32,78
1	50/50		
10	70/50	3,27	42,89
1	50/50		
1 (12 Pulse je Position)	50/50	6,04	143,32
2	50/50		

Im Vergleich zur gestrahlten Referenzoberfläche (ganz rechts in Abbildung 13) zeigen die Laserbehandlungen mit Laser 40 und Laser 41 (beide mit Top-Hat-Laser) sowie Laser 52 und Laser 53 (beide mit Gauss-Profil Laser) auf der Stahloberfläche deutliche Unterwanderungseffekte. Anders im Fall von Laser 42 (Gauss-Profil Laser im Point-Modus), welcher eine zur Referenz vergleichbare Unterwanderungsbeständigkeit aufweist. Auffällig ist zudem, dass bei allen Proben das Versagen der Lackhaftfestigkeit lediglich auf der Stahloberfläche stattfindet, während die Lackadhäsion auf der Schweißnaht nicht versagt. Zudem wurden beim Projektpartner Clean-Lasertechnik Untersuchungen zur Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf handgeförderte Applikationssysteme durchgeführt.

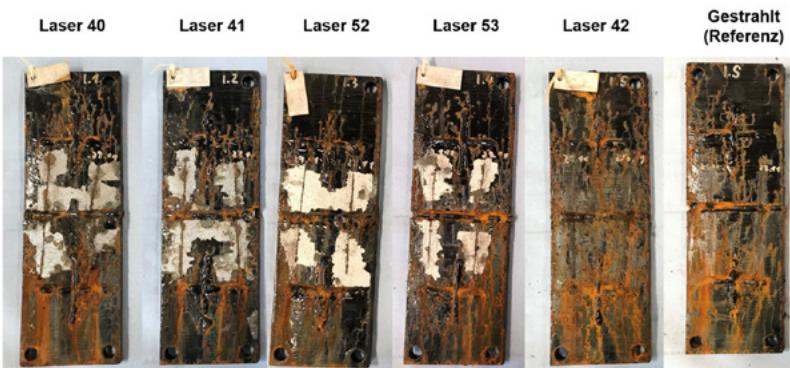


Abb. 13: Lackhaftfestigkeit verschiedener laservorbehandelter Oberflächen im Vergleich zu einer gestrahlten Referenz nach 1000 h Salzsprühstest

Korrosionsbewertung

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Korrosionsprüfungen im Labor und durch Feldauslagerungen auf Helgoland durchgeführt.

Freibewitterung Helgoland

Nach erfolgreicher Entwicklung und Testung der Laserprozesse im Labormaßstab wurden im Rahmen von Feldauslagerungen auf Helgoland Schweißnahtproben für eine Feldauslagerung hergestellt.



Abb. 13a: Mehrwasser-Auslagerungsprüfstand und atmosphärische Bewitterung auf Helgoland

Die Proben wurden nach einem Jahr vom Gestell entfernt und ausgewertet.



Abb. 14: Probenserie 2, Unterwanderung am Ritz



Abb. 15: Probenserie 1 auf Helgoland im Spritzwasserbereich, nach 2 Jahren Auslagerung

Impedanzspektroskopie

Die Korrosionsprüfung im Labor wird mit Hilfe der Elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) durchgeführt. Um diese durchführen zu können wurden Messzellen auf die Bereiche angepasst, bei denen die Beschichtung durch Schweißnähte in unterschiedlicher Ver- und Bearbeitungsqualität vorbelastet sind.

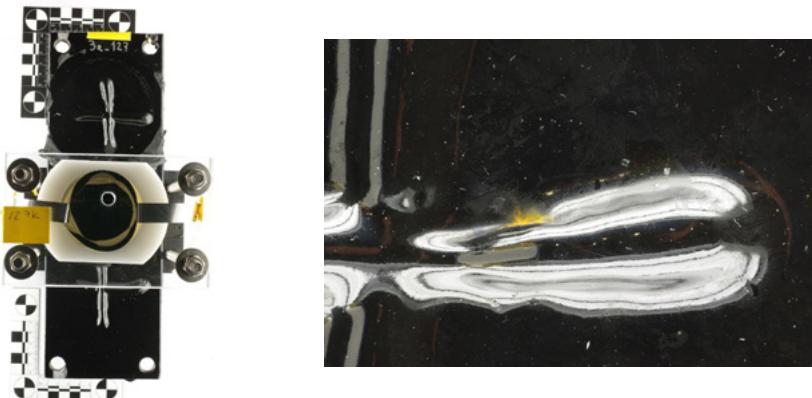


Abb. 16: Aufgesetzte Messzelle in der Mitte und entfernte Messzelle Oberhalb (links). Bilder von dem Defekt der bei den EIS Messungen beobachtet wurde.

Das Versagen der Beschichtung wurde gemessen und die Defekte wurden dokumentiert. Die elektrochemischen Messungen wurden an Proben mit unterschiedlichen Schweißnahtfehlern durchgeführt, um das Korrosionsverhalten der Beschichtungen zu analysieren. Die untersuchten Schweißnahtarten umfassten geriffelte Nähte, Porenbildung und Einbrandkerben. Die Impedanzwerte der „ersten“-Beschichtung lagen je nach Probenstelle zwischen 0,2 GOhm und 5 GOhm. Die „zweite“-Beschichtung zeigte Werte zwischen 0,3 GOhm und 3 GOhm. Bei einigen Proben wurde eine signifikante Reduktion der Impedanzwerte über die Zeit beobachtet, was auf beginnende Korrosionsprozesse hindeutet.

Zyklusbeanspruchung nach DIN EN ISO 12944

Zusätzlich erfolgten Auslagerungsversuche nach DIN EN ISO 12944-0 und es wurden 25 Zyklen gefahren (siehe Abbildung 17)

Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5	Tag 6	Tag 7
UV / Kondensation ISO 16474-3	Neutraler Salzsprühnebel ISO 9227				Frost – 20°C	

Abb. 17: DIN EN ISO 12944-9 Wechselklima-Test

Die Probeplatten durchlaufen:

3 Tage UV-Beanspruchung Verfahren A, Zyklus 1 von ISO 16474-3:2013
3 Tage Beanspruchung mit neutralem Salzsprühnebel nach ISO 9227
1 Tag Beanspruchung bei niedriger Temperatur (-20 ± 2) °C.
und werden nach 0, 1 4, 9 16 und 25 Wochen fotodokumentiert.

In Abbildung 18 ist eine Bewitterungsserie von 48 Serien zu sehen und die Auswertung der einzelnen Serien ist in Abbildung 10 dargestellt.

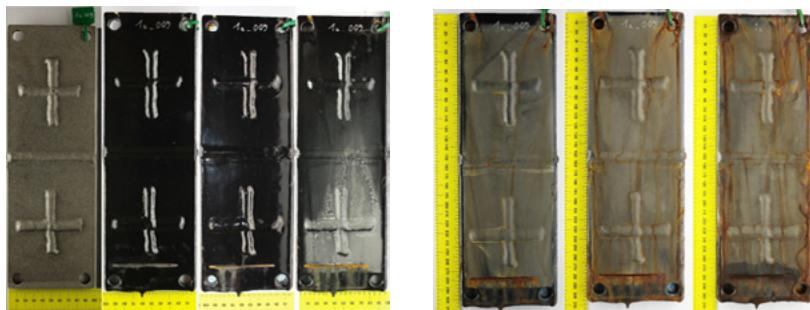


Abb. 18: Die erste Prüfserie mit Probeplatte vor dem Beschichten (links), Beschichtete vor Auslagerung. Probeplatte nach dem 1 Zyklus, nach 4 Zyklen, 9 Zyklen, 16 Zyklen, und 25 Zyklen (rechts)

Parallel wurden auftretende Korrosionserscheinungen und Beschädigungen erfasst die Untersuchung ist bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen erste Tendenzen im Korrosionsverhalten lassen die Proben erkennen.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Beschichtungen „2. Beschichtung“ und „Erste Beschichtung“ unterschiedliche Stabilitätsmerkmale aufweisen. Die „zweite Beschichtung“ verhielt sich anfangs stabil, zeigte jedoch eine leichte Masseabnahme, während die „erste Beschichtung“ eine kontinuierlichere Massezunahme verzeichnete. Die EIS-Messungen verdeutlichen, dass die Impedanzwerte mit der Zeit variieren und Schweißnahtfehler das Korrosionsverhalten erheblich beeinflussen können. Die Langzeitbewitterung bestätigt diese Ergebnisse durch sichtbare Korrosionserscheinungen und Beschädigungen.

Zum Abschluss der Korrosionsprüfungen wurden alle Daten mittels statistischer Versuchsplanung (DOI) intensiver ausgewertet und die Abbildung zeigt die Hauptfaktoren der Einflüsse.

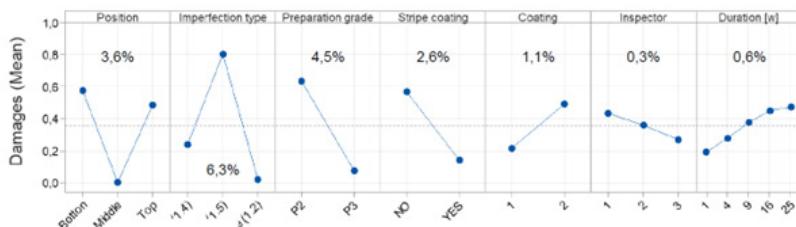


Abb. x: Statistische Auswertung Anova – Haupteffekte und alle Daten

Alle Faktoren außer die Bewertung durch visuelle Begutachtung sind äußerst signifikant ($p < 0,001$)

4. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des Projekts SKALa (03SX565) war die Entwicklung eines robusten, elastischen und korrosionsbeständigen Beschichtungssystems mit Selbstheilungsreagenzien, speziell für Schweißnähte. Im Rahmen der Laservorbereitung wurde ein alternatives Verfahren zur Nachbehandlung von Schweißnähten validiert, das sich mit den bisherigen Methoden vergleichen lässt. Laser ermöglichen eine strahlmittelfreie Nachbearbeitung von Oberflächen, wobei verschiedene Behandlungsgrade eingestellt werden können. Da diese Technologie im Offshore-Bereich bislang noch nicht erprobt wurde, stellt sie eine Neuerung im maritimen Sektor dar.

Darüber hinaus konnte durch die Kombination von Laservorbereitung und Beschichtung bei der Nachbearbeitung von Schweißnähten eine signifikante Standzeitverlängerung maritimer Strukturen erzielt werden.

Im Rahmen des geförderten Forschungsprojekts SKALa haben die Projektpartner intensiv zusammengearbeitet. Gemeinsam wurden die komplexen Zusammenhänge zwischen Beanspruchung und Schutzwirkung systematisch untersucht und alternative Methoden (Laservorbereitung) sowie Werkstoffe (flexible Beschichtungen) für die Behandlung und den dauerhaften Schutz von Schweißnähten entwickelt.

Wesentliche Erkenntnisse:

- Der Vorbereitungsgrad P3 von Schweißnähten ist notwendig.
- Bei Untercuts und Schweißwellen ist eine P3-Vorbereitung, insbesondere bei Schweißporositäten, unvermeidbar.
- Laservorbereitung ist gleichwertig zu Strahlverfahren.
- Elastifizierbare Beschichtungen erhöhen den Korrosionsschutz.

- Selbstheilungsreagenzien verbessern den Korrosionsschutz geringfügig.
- Die Schichtdicke der Beschichtung sollte > 500 µm betragen.
- Dynamische Beanspruchungen haben nur einen geringen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit.

Im Oktober 2025 werden verschiedene vorbereitete und beschichtete Mockups auf der Hochseeinsel Helgoland für mindestens zwei Jahre ausgelagert. Anschließend sollen die gewonnenen Erkenntnisse mit den Laboruntersuchungen verglichen und evaluiert werden.

Danksagung

Das Konsortium bedankt sich bei dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projekts und beim Projektträger Jülich (PtJ) für die sehr gute Betreuung des Projektes und für die konstruktive Zusammenarbeit.

Literatur

[1.] Coating breakdown, corrosion, structural failure leading to possible design ramifications. Contraros, P. D. London : s.n., April 23, 2003, Lloyds List Events: Prevention and Management of Marine Corrosion.

[2.] A statistical study into parameter effects on the coverage of organic coatings on rounded steel edges. Momber, A. W., et al. 2016, Progr. in Organ. Coat., Vol. 101, pp. 186-194.

[3.] Effects of edge treatment parameters on the protection performance of organic coating systems in a wave chamber. Momber, A. W., et al. 2017, Progr. in Organ. Coat., Vol. 102, pp. 167-177.

[4.] Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions. Momber, A. W., et al. 2017, Progr. in Organ. Coat., Vol. 108, pp. 90-92.

- [5.] Investigation of coating failure on the surface of a water ballast tank of an oil tanker. Lee, D. G. and Kim, B. C. 2005, J. Adhesion Sci. Technol., Vol. 19, pp. 879-908.
- [6.] Fatigue of Welded Structures. Gurney, T. R. Cambridge : s.n., 1979, Cambridge University Press.
- [7.] Evaluating the performance of organic coatings under mechanical stress using electrochemical impedance spectroscopy. Darowicki, K. and Szocinski, M. 2004, J. Solid State Electrochem., Vol. 8, pp. 346-351.
- [8.] Øyen, A., et al. Internal stress and mechanical properties of paint films. NACE Int. Houston, TX, USA : s.n., 2007. NACE Corrosion 2007.
- [9.] Pedersen, T. L. and Jensen, C. K. Fiber reinforced crack resistant coatings for ballast tanks. NACE Int. Houston, TX, USA : s.n., 2006. Paper 06038.
- [10.] On mechanical interaction between steel and coating in stressed and strained exposed locations. Ringsberg, J. W. and Ulfvarson, A. Y. J. 1998, Marine Struct., Vol. 11, pp. 231-250.
- [11.] ISO. DIN EN ISO 8501-3: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit – Teil 3: Vorbereitungsgrade von Schweißnähten, Kanten und anderen Flächen mit Oberflächenunregelmäßigkeiten. Genf, Schweiz : s.n., 2007.

03SX568

KISSL

**KI-basierte Fertigungstechnologie für
das autonome Laserschweißen komplexer
Schiffstrukturen**

Autorenliste

MEYER WERFT GmbH

Marvin Drößer

Fraunhofer IIS Dresden

Dr. Olaf Enge-Rosenblatt

SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH

Sascha Gunkel

Laserline GmbH

Dr. Johannes Nittinger



1. Motivation und Zielstellung

Die Fertigung komplexer Schiffstrukturen ist im europäischen Schiffbau durch hohe Qualitätsanforderungen, große Bauteilkomplexität und wachsende internationale Konkurrenz geprägt. Während sich in der Produktion standardisierter Paneele (Deck- und Wandsektionen) bereits hochautomatisierte Fertigungsprozesse etabliert haben, erfordern zunehmend kleinere und komplexere (Sonder-) Module eine manuelle oder teilmechanisierte Bearbeitung. Verbunden ist dies mit höheren Maßabweichungen, die wiederum höhere Energieeinträge erfordern und damit verbunden zu Bauteilverzug sowie erheblichen Nacharbeitsaufwänden führen.

Das Projekt **KISSS („KI-basierte Fertigungstechnologie für das autonome Laserschweißen komplexer Schiffstrukturen“)** adressierte diese Herausforderung durch die Entwicklung einer neuartigen, adaptiven Schweißtechnologie. Ziel war es, die Situationsorientierung des manuellen Schweißers mit der Effizienz automatisierter Prozesse zu verbinden. Dadurch sollen in der Zukunft einerseits die Produktivität in der Vorfertigung komplexer Schiffsbaugruppen um bis zu 20 % gesteigert und andererseits Nacharbeiten um rund 30 % reduziert werden.



Abb. 1: Herausforderungen beim automatisierten Schweißen im Schiffbau

Folgende Innovationsfelder standen im Projekt im Fokus:

- **Flexible Automatisierungslösungen** für variantenreiche Schiffsbaugruppen
- **Simulationsgestützte Strategien** zur Minimierung von Verzug und Maßabweichungen
- **Ein robuster Laserstrahl-Draht-Schweißprozess** für gezielten und reduzierten Wärmeeintrag
- **Adaptive Prozessregelung** auf Basis intelligenter Sensorik und KI-Methoden
- **Ein kompakter Bearbeitungskopf** mit hoher Zugänglichkeit auch für schwer erreichbare Schweißpositionen

Durch die Integration dieser Aspekte in ein ganzheitliches Fertigungskonzept wurde ein technologieoffener, praxisnaher Demonstrator geschaffen, der nächste wichtige Umsetzungsschritte ermöglichen wird. Damit leistete KISSS einen Beitrag zur maritimen Digitalisierung, zur Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und zur Umsetzung der „Maritime Agenda 2025“, insbesondere in den Bereichen smarte Produktionssysteme, datenbasierte Qualitätssicherung und ressourceneffiziente Fertigung.

2. Methodik und Technischer Ansatz

Die schiffbauliche Vorfertigung ist heute durch eine deutliche Zwei teilung geprägt. Während Standardpaneele wie Deck- und Wand sektionen hochautomatisiert mit etablierten Hochleistungsschweiß verfahren hergestellt werden, erfordern komplexere Module mit 2½D- und 3D-Geometrien nach wie vor einen hohen Anteil manueller oder teilmechanisierter Schweißarbeit. Ursache hierfür sind geometrische Abweichungen, variierende Spaltmaße sowie manuelle Heftstellen, die mit konventionellen Schweißprozessen

nur unter erheblichem Energieeintrag bewältigt werden können. Dieser Ansatz ist zwar robust, führt jedoch zu maßgeblichen Verzügen, Qualitätsabweichungen und einem hohen Bedarf an Nacharbeit.

Genau an dieser Stelle setzte das Projekt KISSS an. Verfolgt wurde dabei ein interdisziplinärer Ansatz, der Werkstofftechnik, Laserstrahlschweißverfahren, Automatisierungstechnik und Methoden der Künstlichen Intelligenz miteinander verbindet. Die methodische Vorgehensweise umfasste zunächst eine umfassende Analyse der spezifischen Prozessbedingungen in der Vorfertigung des Sonder-schiffbaus. Dabei wurden sowohl die geometrischen und fertigungs-technischen Rahmenbedingungen als auch die resultierenden Verformungen erfasst. Durch Einsatz simulativer Methoden wurden bereits hier niedrigschwellige Potentiale zur Verzugsreduzierung durch optimierte Schweißstrategien betrachtet.

Parallel dazu wurden Schlüsseltechnologien entwickelt, die eine neuartige Qualität in der Fertigung ermöglichen. Dazu zählten ein kompakter Bearbeitungskopf mit integrierter Optik, Sensorik und Aktorik der Firma Laserline GmbH sowie ein durch die SLV-MV entwickelter robuster Laser-Draht-Schweißprozess für variable Spaltmaße bis zwei Millimeter, der die schiffbautypischen Anforde-rungen erfüllt. Ergänzend wurde von der MEYER WERFT ein Konzept zur flexiblen Automatisierung erarbeitet, das den Einsatz neuer Schweißtechnologien in realen Fertigungsumgebungen ermöglicht. Diese Entwicklungen bildeten die Grundlage für eine hochflexible Automatisierung, die über die bisherigen Grenzen konventioneller Systeme hinausgeht. Aber auch näher am Stand der Technik orien-tierte Mechanisierungslösungen zum flexiblen Einsatz optimierter Schweißprozesse an schiffbaulichen Bauteilen waren Teil der Betrachtung.

Ein zentrales Element des Projektes war die Nutzung von Künst-licher Intelligenz für die Prozessoptimierung und -regelung. Auf Basis von Simulations- und Realdaten wurden seitens Fraunhofer IIS/EAS optimale Schweißstrategien abgeleitet, während gleichzeitig

eine Echtzeitanalyse von Prozessdaten wie Spaltbreite, Einschweißtiefe oder Nahtqualität erfolgte. Als Eingangsgrößen dienten sowohl sensorisch erfasste Messwerte, etwa Geometrieinformationen aus Linienscannern, Prozesssignale wie Temperatur- und Leistungswerte sowie Qualitätsindikatoren der Naht, als auch simulationsbasierte Vorhersagen zum Verzug. Die Ausgangsgrößen umfassten die Steuerung zentraler Prozessparameter wie Laserleistung, Drahtvorschub, Schweißgeschwindigkeit und Strahlposition. Daraus entstand ein selbstlernender Regelkreis, der in der Lage ist, die Prozessparameter kontinuierlich und adaptiv an die jeweilige Situation anzupassen. Der Schweißprozess ist damit nicht länger am ungünstigsten Fall ausgerichtet, sondern orientiert sich nun dynamisch an den tatsächlichen Gegebenheiten.

In einem abschließenden Schritt wurden die entwickelten Technologien zu einem anwendungsnahen Gesamtsystem integriert. Dieses wurde zunächst im Labormaßstab validiert und anschließend an realitätsnahen Strukturauteilen im werftnahen Umfeld erprobt. Ziel war die Demonstration einer autonomen Schweißlösung, die die Situationsorientierung erfahrener Fachkräfte mit der Produktivität und Wiederholgenauigkeit automatisierter Systeme verbindet. Auf diese Weise entstand eine Fertigungstechnologie, die nicht nur die besonderen Herausforderungen variantenreicher Schiffbaugruppen adressierte, sondern zugleich übertragbare Ansätze für weitere Anwendungsfelder eröffnete.

3. Komponenten und Umsetzung

Das Projekt KISSS verfolgte einen ganzheitlichen Ansatz, bei dem die Stärken aller Partner in einem gemeinsamen Gesamtsystem zusammengeführt wurden. Die Umsetzung erfolgte modular entlang der zentralen Entwicklungsstränge Prozess- und Technologieentwicklung, Strahlquelle und Optik, Automatisierungstechnik sowie Simulation und KI-Regelung.

Die **MEYER WERFT** übernahm dabei die Rolle des Anwenders und definierte die praktischen Anforderungen an die Fertigungstechnologie. Hierfür wurde ein umfassender Bauteilkatalog erstellt, aus dem repräsentative Referenzbauteile ausgewählt wurden. Diese dienten sowohl als Grundlage für Simulationen als auch für Validierungsschweißungen. Darüber hinaus verantwortete die MEYER WERFT die Integration der KISSS-Technologien in eine werftnahe Demonstrationsumgebung und entwickelte parallel ein flexibles Automatisierungskonzept auf Basis kollaborativer Robotik. Ein Cobot-System wurde dabei an die Bedingungen der Sektionsfertigung für die spätere Überführung in die Praxis angepasst.

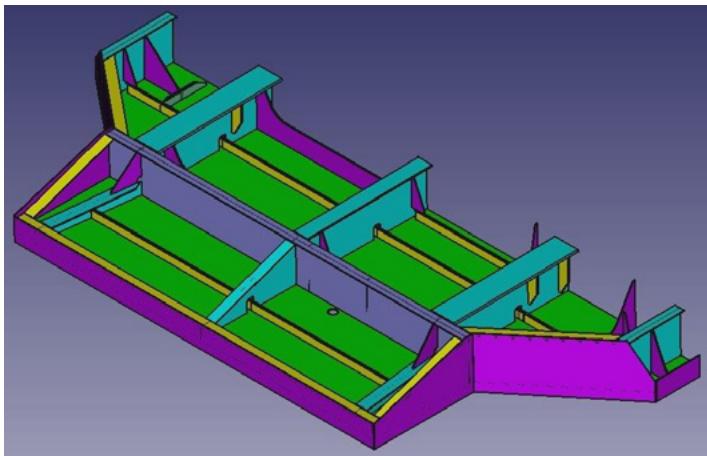


Abb. 2: Sonderpodest als Referenzbauteil

Abbildung 2 zeigt das Referenzbauteil „Sonderpodest“. Dieses stellt eine repräsentative Struktur dar, welche in der heute manuellen Fertigung große schweißtechnische Aufwände und zum Erreichen der geforderten Qualität erhöhte fertigungstechnische Anforderungen mit sich bringt. Eine automatisierte Abarbeitung und der Einsatz deutlich energiereduzierter Schweißprozesse könnten hier enorme Produktivitätsvorteile über die gesamte Wertschöpfungskette heben. Zu beachten sind dabei aber die herausfordernden Zugänglichkeiten zu den Schweißaufgaben. Aufgrund dieser Zusammenhänge wurde dieses Bauteil für KISSS als Referenz ausgewählt.

Die **SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH** bearbeitete die prozess-technischen Kernfragen. Im Mittelpunkt stand dabei die Entwicklung und Validierung eines robusten Laserstrahl-Draht-Schweißprozesses für schiffbauliche Kehlnähte mit tiefem Einbrand. Neben Parameterstudien mit unterschiedlichen Drahtdurchmessern und Spaltgeometrien wurden auch alternative Ansätze wie Heißdrahtzufuhr und der Einsatz von Scanneroptiken untersucht. Es konnten durch die Reduktion des a-Maßes, den Einsatz großflächiger Spotdurchmesser sowie die Entwicklung angepasster Heftkonzepte wesentliche Fortschritte erzielt werden. Zudem stellte die SLV M-V die Verbindung zu den regulatorischen Anforderungen der Klassifikationsgesellschaften her, um eine spätere Zulassung des Verfahrens sicherzustellen.

Die **Laserline GmbH** lieferte die photonische Kerntechnologie. Entwickelt wurden zwei Hochleistungs-Konverterlaser mit einer Ausgangsleistung von bis zu 12 kW, die bei der SLV M-V und der MEYER WERFT zum Einsatz kommen. Ergänzt wurden die Strahlquellen durch kompakte Bearbeitungsoptiken mit Spot-in-Spot-Technologie, die durch integrierte Sensorik und Aktorik für die nahtgenaue Prozessführung erweitert wurden. Darüber hinaus konnten Laser-Linienschnittsensoren erfolgreich integriert werden, welche die Spalt- und Nahtgeometrie in Echtzeit erfassen. Mit mechanischen Optimierungen und zusätzlichen Filtertechnologien wurde die Robustheit des Gesamtsystems auch unter rauen Schweißbedingungen getestet.

Das **Fraunhofer IIS/EAS** verantwortete die Simulations- und KI-Komponenten. In einem ersten Schritt wurden thermomechanische Finite-Elemente-Modelle entwickelt, die das Verformungsverhalten schiffbaulicher Strukturen in Abhängigkeit von Schweißstrategie und Prozessparametern abbilden. Darauf aufbauend konnten prinzipielle Untersuchungen zum Einfluss der Schweißreihenfolge auf Verzug und Maßabweichungen durchgeführt werden. Parallel wurden KI-Algorithmen für die adaptive Prozessregelung konzipiert. Ein zentrales Element war ein datenbasiertes Modell des Schweißprozesses, das Sensordaten und Prozessparameter verknüpft, um Abweichungen zu detektieren, die Nahtqualität zu

bewerten und Parameter während des Prozesses zu optimieren. Hierzu wurde ein durchgängiges Kommunikationssystem zwischen Sensorik, Steuerung und KI-Regler realisiert, basierend auf Feldbus- und MQTT-Technologien sowie der EAS-eigenen Datenkommunikationsplattform DeepInsights.

Die Umsetzung des Projektes erfolgte durch die sukzessive Integration der durch Laserline entwickelten bzw. zusammengeführten Komponenten. Strahlquelle, Bearbeitungsoptik und Sensorik bildeten zusammen mit einem Schweißrobotersystem die hardwareseitige Basis. Ergänzt wurde diese durch die prozesstechnischen Grundlagen der SLV M-V und die simulations- und KI-basierten Softwaremodule vom Fraunhofer EAS. In einer iterativen Test- und Validierungsphase wurden die Einzelkomponenten zunächst in den Laborumgebungen der Partner geprüft und anschließend in ein werftnahes Demonstrationssystem auf der MEYER WERFT überführt. Ziel war ein adaptives Schweißsystem, das situativ und autonom agiert, dabei den Wärmeeintrag minimiert, Verzug reduziert und zugleich die Produktivität der Vorfertigung steigert.

4. Validierung und Demonstration

Die Validierung der im Projekt KISSS entwickelten Komponenten und Ansätze erfolgte in mehreren Stufen, von grundlegenden Prozessuntersuchungen im Labor über simulationsgestützte Optimierungen bis hin zur Erprobung an realitätsnahen Strukturauteilen. Ziel war es dabei, die einzelnen Entwicklungen nicht isoliert zu bewerten, sondern ihre Funktionalität und ihr Zusammenspiel im Gesamtsystem nachzuweisen.

In der frühen Projektphase lag der Fokus auf Parameterstudien und Grundlagenversuchen, die primär an der SLV M-V durchgeführt wurden. Hierbei konnten die wesentlichen Einflussgrößen auf den Laserstrahl-Draht-Schweißprozess identifiziert und stabile Prozessfenster für unterschiedliche Spaltmaße definiert werden.

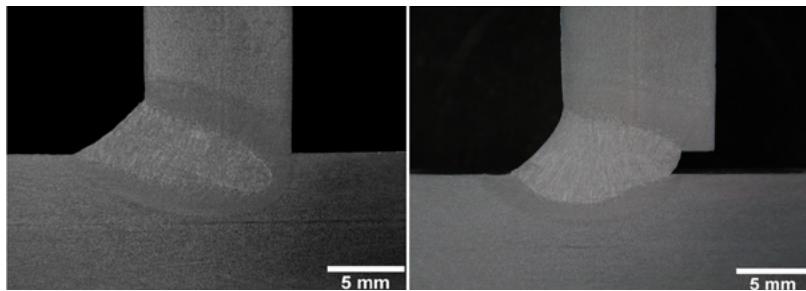


Abb. 3: Makroschliff zweier Schweißnähte an A36 mit $t=10$ mm (links: Nullspalt, rechts: Spaltmaß = 2 mm)

Parallel dazu erprobte die Laserline GmbH die entwickelten Hochleistungsstrahlquellen und Bearbeitungsoptiken zunächst intern und anschließend in enger Abstimmung mit den Projektpartnern. Erste Tests zeigten, dass die integrierte Sensorik eine präzise Erfassung der Nahtgeometrie und damit eine Grundlage für die spätere Regelung schaffen kann.

Zur simulationsgestützten Validierung entwickelte das Fraunhofer IIS/EAS thermomechanische Modelle, die den Bauteilverzug in Abhängigkeit von Prozessparametern und Schweißreihenfolgen abbilden. Diese Simulationen wurden mit experimentellen Ergebnissen der MEYER WERFT abgeglichen. Beispielsweise ließ sich der Verzug einer Deckplatte durch eine gezielte Variation der Schweißreihenfolge deutlich reduzieren. Damit konnte der Nutzen der Simulation als Werkzeug für die Prozessplanung sinnvoll demonstriert werden.

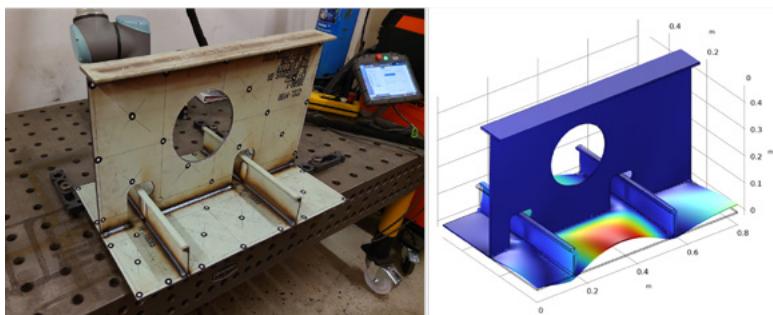


Abb. 4: Simulation und geschweißte Deckplatte

Ein wesentliches Element zur Demonstration und Überführung der im Projekt erzielten Ergebnisse in die Praxis war das entwickelte flexible Automatisierungssystem. Während sich viele Untersuchungen zunächst auf den Labormaßstab beschränkten, bietet dieses System Möglichkeiten zur direkten Validierung und Weiterentwicklung technologischer Ansätze im realen Anwendungsumfeld des Sonderschiffbaus. Hiermit konnte bereits gezeigt werden, dass erzielte Fortschritte nicht nur unter kontrollierten Laborbedingungen Bestand haben, sondern auch den spezifischen Herausforderungen der industriellen Fertigung standhalten. Neben der angestrebten Vollautomatisierung stellt das System zugleich eine niedrigschwellige Mechanisierungslösung bereit, mit der die aufgezeigten Potenziale schrittweise in die Produktion überführt werden können. Damit wurde ein praxisnaher Pfad der Verwertung eröffnet, von der unmittelbaren Nutzung einzelner Prozessbausteine über teilautomatisierte Lösungen bis hin zur vollständigen Integration eines autonomen Schweißsystems in die Werftfertigung.



Abb. 5: Zugänglichkeitsuntersuchungen mit dem flexiblen Automatisierungssystem an Bauteilen im Sonderschiffbau der MEYER WERFT

In der F&E-Umgebung der MEYER WERFT entstand außerdem ein Testfeld, in dem Strahlquelle, Optik, Sensorik und KI-Regelung integriert und im produktionsnahen Umfeld erprobt wurden. Hierzu gehörte auch die Einbindung der Daten- und Kommunikationsplattform, die eine Echtzeitregelung der Schweißparameter erlaubt. Erste Funktionsversuche im Laborumfeld zeigten bereits, dass Prozessgrößen wie Laserleistung, Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit automatisiert angepasst werden können, sobald die Sensorik Abweichungen detektiert.



Abb. 6: Versuchsaufbau im Labor

Die abschließende Demonstration Ende 2025 sieht die ganzheitliche Erprobung des KISSS-Systems an relevanten Strukturen und die Übertragung von Systematiken auf komplexe Schiffbauteile vor. Dabei sollen nicht nur die technologische Machbarkeit, sondern auch Produktivitätskennzahlen und Qualitätsvorteile nachgewiesen werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Verbundprojekt KISSS wurde erstmals eine Fertigungs-technologie für den Schiffbau entwickelt, die die situative Kompetenz erfahrener Schweißer mit der Präzision und Produktivität automatisierter Prozesse verbindet. Ausgangspunkt war die Beobachtung, dass komplexe und variantenreiche Schiffbauteile bislang nur mit hohem manuellem Aufwand hergestellt werden können, während standardisierte Sektionen bereits hochautomatisiert gefertigt werden. Dies führt zu einem steigenden Bedarf an Lösungen, die auch für Sondermodule wirtschaftlich und qualitätsgesichert eingesetzt werden können.

Im Projektverlauf ist es gelungen, wesentliche Grundlagen für ein solches System zu schaffen. Die MEYER WERFT hat dabei repräsentative Referenzbauteile definiert und ein flexibles Automatisierungskonzept entwickelt, wodurch die Übertragbarkeit in den realen Fertigungskontext sichergestellt werden soll. Die SLV M-V hat durch systematische Prozessuntersuchungen robuste Parameterfenster für den Laserstrahl-Draht-Schweißprozess erarbeitet und ergänzende Heftkonzepte entwickelt. Die Laserline GmbH hat mit der Bereitstellung leistungsfähiger Strahlquellen, Spot-in-Spot-Optiken sowie integrierter Sensorik und Aktorik die photonische Basis gelegt. Das Fraunhofer IIS/EAS schließlich konnte mit simulationsgestützten Analysen und der Entwicklung einer Daten- und KI-Plattform die Voraussetzungen für eine adaptive Prozessregelung schaffen.

Die Validierung der Technologien erfolgte schrittweise von Laborversuchen über simulationsgestützte Optimierungen bis hin zu Tests an realitätsnahen Demonstratoren. Mit der Integration der KI-basierten Prozessregelung konnte schließlich die abschließende Demonstrationsphase durchgeführt werden, in der die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems unter realistischen Bedingungen nachgewiesen wurde.

Für die Verwertungsperspektive besonders bedeutsam war das im Projekt entwickelte flexible Automatisierungssystem. Es eröffnet die Möglichkeit, die im Labor erarbeiteten Technologien auch im realen Werftumfeld schrittweise einzuführen, von einfacheren Mechanisierungslösungen bis hin zur vollständigen Integration eines autonomen Schweißsystems. Damit entsteht ein praxisnaher Pfad, über den die erzielten Ergebnisse nachhaltig in die industrielle Fertigung überführt werden können.

Der Ausblick geht über die reine Projektumsetzung hinaus. Mit KISSS entstand so eine Technologieplattform, die nicht nur im Schiffbau, sondern auch in anderen Branchen wie etwa im Stahlbau, im Anlagenbau oder in der Energietechnik Anwendung finden kann. Darüber hinaus eröffnet die enge Verzahnung von Simulation, Sensorik und KI neue Möglichkeiten für eine generische, datengebogene Prozessführung in der Schweißtechnik. Damit leistet KISSS nicht nur einen Beitrag zur digitalen Transformation der maritimen Industrie, sondern liefert auch Impulse für eine breitere industrielle Nutzung adaptiver Fertigungstechnologien.

Literatur

[1] Schimke, A.: KI zur Optimierung des Schweißprozesses – Wie soll das gehen? Vortrag, Rostocker Schweißstage, Rostock, 26. /27. November 2024.

[2] Enge-Rosenblatt, O.: Optimale Schweißnähte mittels KI – Das Projekt KISSS. Deutscher Schifffahrtstag, Fachtagung KI in der maritimen Branche, Hamburg, 06.-08. Mai 2025.

HYDROPOLEN

**Verbrennungs- und Gemischbildungskonzepte
zur Erhöhung der Leistungsdichte wasserstoff-
betriebener Großmotoren**

Autorenliste

Everlence SE

Dr.-Ing. Cornelius Wagner
Björn Dirumdam
Dr.-Ing. Marcus Becher
Dominik Winkler

Technische Universität München, Lehrstuhl für Nachhaltige mobile Antriebssysteme

Sven Ole Deist

Tenneco Inc.

Dr.-Ing. Rainer Capellmann
Jens Wellmann
Dr.-Ing. Martin Wenzelburger
Florian Schellenberg

WTZ Roßlau gGmbH

Dr.-Ing. Kay Mahler
Dr.-Ing. Konstantin Pryymak
Robert Meinert



1. Einleitung

Die maritime Schifffahrt verursacht rund 2 – 3 % der globalen CO₂-Emissionen [1]. Um die Klimaziele der Internationalen Seeschifffahrtsorganisation (IMO) zu erreichen, rückt Wasserstoff als emissionsfreier Energieträger in den Fokus. Im Vergleich zu Methanol und Ammoniak bietet Wasserstoff Vorteile wie CO₂-freie Verbrennung und Ungiftigkeit, stellt jedoch hohe Anforderungen an Speicherung, Sicherheit und Infrastruktur.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotors mit hoher Leistungsdichte und sicherem Betrieb für den maritimen Einsatz. Untersucht werden:

- Optimierung von Gemischbildung, Zündung und Tribologie
- Minimierung von Klopfen, Vorentflammung, Backfire und NO_x-Emissionen
- Anpassung von Materialien, Sensorik und Sicherheitssystemen

Das Projekt strebt ein ganzheitliches Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Brennstoff, Motorarchitektur und Betriebsstrategie an. Grundlage ist der Betrieb eines 1-Zylinder-Forschungsmotors mit Wasserstoff.

2. Injektorentwicklung, Zündkomponenten und Tribologie

Entwicklung des Injektors

Im Rahmen der Entwicklung eines wasserstoffbasierten Verbrennungsmotors wurde ein direkteinblasender Injektor konzipiert, der speziell auf die Anforderungen des gasförmigen Kraftstoffs abgestimmt ist. Durch mehrere iterative Entwicklungsschleifen konnte die Injektorleistung gezielt verbessert und an die dynamischen Anforderungen des Motorbetriebs angepasst werden.

Mittels dreidimensionaler CFD-Simulationen wurden verschiedene Strategien der Wasserstoff-Direkteinspritzung analysiert und unterschiedliche Geometrien von Injektorkappen gegenübergestellt. Die numerischen Untersuchungen erfolgten mit Star-CCM+ und berücksichtigen die zeitlich aufgelöste Bewegung von Ventilen und Kolben während des Ladungswechsels. Die physikalische Modellierung basiert auf einem mehrkomponentigen, nicht-reaktiven Realgasmodell. Die Turbulenz wird durch das k- ϵ -Modell beschrieben. Eine zeitabhängige Gitterverfeinerung, insbesondere während der Wasserstoffeinblasung, ermöglicht eine hochauflösende Darstellung der relevanten Mischprozesse.

Untersucht wurde eine Konfiguration für den 35/44G TS mit versetzter Injektorposition zwischen Einlass- und Auslasskanal. Die Ergebnisse zeigen, dass eine saugsynchrone Einspritzung eine signifikant höhere Gemischhomogenität erzielt als eine Einspritzung bei geschlossenen Ladungswechselventilen. Dies ist auf die verlängerte Mischungszeit sowie die durch die einströmende Luft induzierte Turbulenz zurückzuführen, welche den Mischprozess begünstigt.

In der G TS-Konfiguration zeigte die Einlochvariante vielversprechende Ergebnisse. Der gerichtete Kraftstoffstrahl in die Kolbenmulde reduziert die Interaktion des Wasserstoffs mit Bauteilen wie Brennraumdach, Zylinderlaufbuchse oder auch dem Feuersteg, wodurch Vorentflammungseffekte minimiert werden können.

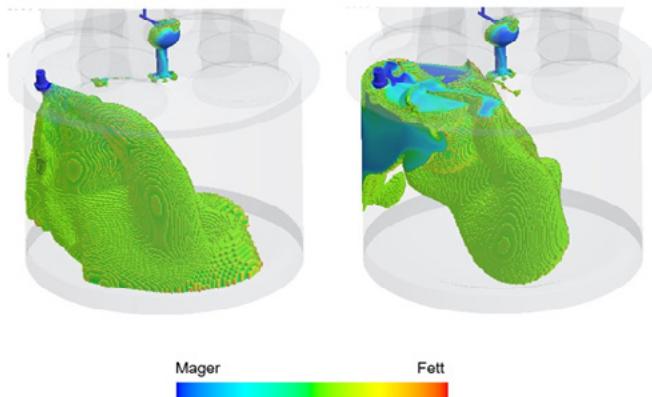


Abb. 1: 35/44GTS 7-Loch Injektor und 1-Loch Injektor: Lambdaverteilung während der Einblasung von H₂

H₂ Komponentenprüfstand

Bei der Entwicklungsphase der Komponenten und auch zur Validierung der Entwicklung war es notwendig ein geeignetes Prüfverfahren für eine H₂-Injektorcharakterisierung unter realen Wasserstoffbedingungen zu etablieren und die Kennfelder zu vermessen. Dieses ermöglicht eine zielgerichtete, experimentelle Validierung der Injektordüsenkonzepte mit einer direkten Rückkoppelung zu den CFD-Simulationen, CAD-Designkonzeptphasen und der Brennverfahrensentwicklung.

Der in diesem Zusammenhang entwickelte Komponentenprüfstand für Großmotoren-H₂-Einspritzkomponenten wurde als Kreislaufsystem ausgelegt, wobei alternativ auch ein verlustbehafteter Direktbetrieb möglich ist. Eine Verbrennung des Testgases nach dessen Expansion am Injektordüsenaustritt findet nicht statt. Stattdessen kann das Testmedium (H₂/N₂), unter Einhaltung sämtlicher sicherheitstechnischer Vorschriften, erneut verdichtet und dem System zurückgeführt werden, sodass Einblasedrücke von bis zu ca. 70 bar erreicht werden können (Abb. 2).

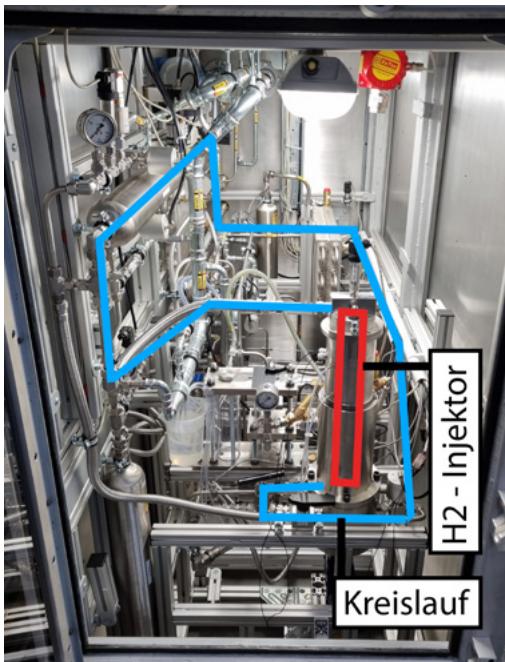


Abb. 2: H₂ Komponentenprüfstand

Die aus den Funktions- und Dauerlauferprobungen gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die Iterationsschleifen der am Konsortium beteiligten Projektpartner ein. Auf diese Weise können konstruktive, material- sowie fertigungs- und montageprozesstechnische Validierungen bzw. Anpassungen gezielt vorgenommen werden.

Die am Komponentenprüfstand steuer- und erfassbaren Größen umfassen unter anderem Eingangs- und Ausgangsdruck, Massenstrom, Gaseintrittstemperatur, Injektortemperatur sowie den Nadelhub. Abb. 3 zeigt exemplarisch den Nadelhubverlauf sowie das Druckverhalten vor dem Injektor-Einlass eines Prototypen-Wasserstoffinjektors. Dabei werden lange Ventilöffnungszeiten bei reduzierter simulierter Drehzahl untersucht, um das Verhalten des Injektors besser zu verstehen. Die auf den Messdaten basierenden Erkenntnisse sind nicht nur für CFD-Simulationen und die Validie-

rung der Komponentenentwicklung von Bedeutung, sondern tragen auch wesentlich dazu bei, die Zuverlässigkeit des Gesamtinjektors vor dem Einsatz an einem Ein- oder Mehrzylinderversuchsmotor sicherzustellen.

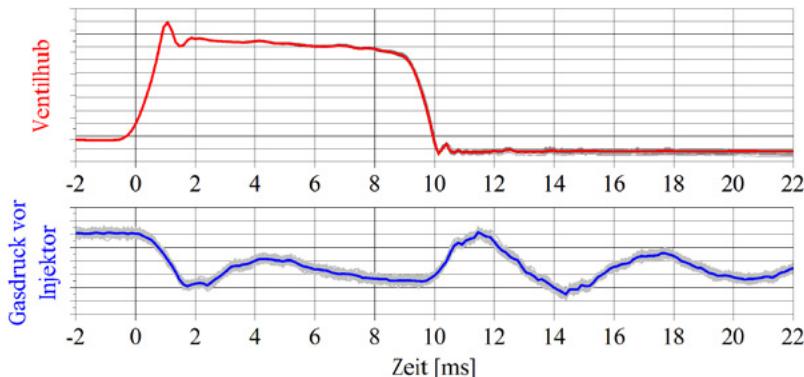


Abb. 3: Untersuchung des Injektor-Nadelhub & Gasdruckes eines H₂-Injektors am Komponentenprüfstand

Zudem ermöglicht dieses Testsystem die Konzeption standardisierter Prüfverfahren für Wasserstoffeinspritzkomponenten. Diese Standards können, in Kombination mit ergänzenden Untersuchungen weiterer Einspritzsystemkomponenten, eine belastbare Grundlage für die zukünftige Entwicklung von Wasserstoffmotoren schaffen. Auf diese Weise wird nicht nur die Vergleichbarkeit von Versuchsergebnissen verbessert, sondern auch die Effizienz der Entwicklungsprozesse gesteigert. Darüber hinaus tragen die gewonnenen Erkenntnisse dazu bei, technologische Risiken frühzeitig zu identifizieren und die Zuverlässigkeit sowie Langlebigkeit der Komponenten im realen Betrieb sicherzustellen.

Entwicklung von Zündkerzen

Vom Projektpartner Tenneco wurden die zentralen Herausforderungen bei der Entwicklung der Zündkerze für Wasserstoffmotoren analysiert. Wasserstoff weist eine gute Entflammbarkeit bei geringer Zündenergie auf, was eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber

heißen Oberflächen und Fehlzündungen zur Folge hat. Um Oberflächenentzündungen an der Zündkerze zu vermeiden, liegt das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung auf einer möglichst niedrigen Arbeitstemperatur (< 600 °C) der Zündkerze. Die höhere Durchbruchsspannung belastet elektrische Komponenten und verkürzt die Lebensdauer konventioneller Zündkerzen. Weitere Probleme können Wasserstoffversprödung, sogenanntes Water-Bridging bei Kaltstarts und die Gefahr katalytischer Selbstzündung durch Verwendung von Edelmetallen darstellen.

Zur Begegnung dieser Herausforderungen wurden mehrere Zündkerzendesigns entwickelt. Diese zeichnen sich durch einen reduzierten Elektrodenabstand (0,15 mm) zur Reduzierung der Zündspannung sowie durch eine vergrößerte, kupfergefüllte Mittelelektroden (\varnothing 3,8 mm) und Einsatz von wärmeleitfähigen Materialien zur Verbesserung der Wärmeabfuhr aus. FEM-Simulationen zeigten, dass mit diesen Maßnahmen die Elektrodentemperatur bis zu 23 % reduziert werden kann. Weiterhin wurde das Design einer passiven Vorkammerzündkerze entwickelt, welches durch eine CFD-optimierte Geometrie eine zuverlässige Zündung des Everlence 35/44 H₂ Motors ohne aktive Vorkammer ermöglichen soll. Die entwickelten Zündkerzendesigns wurden mittlerweile als Prototypen gefertigt und zur Erprobung und Bewertung im Rahmen von Brennungsversuchen zur Verfügung gestellt.

Entwicklung von Kolbenringpaketen

Die Auslegung und Optimierung des Kolbenringpakets von Großmotoren erfolgt beim Projektpartner Tenneco u. a. durch die Analyse der Kolbenringdynamik mittels der eigenentwickelten Simulationssoftware PRIME 3D®. Die Auseinandersetzung mit der Theorie der Wasserstoffverbrennung, den theoretischen Herausforderungen zur Abdichtung der Brennkammer sowie den ersten Erfahrungen aus dem Betrieb von H₂-ICE zeigt, dass die bestehenden physikalischen Simulationsmodelle die Kolbenringdynamik im H₂-ICE nicht ausreichend genau abbilden. Verantwortlich hierfür ist die spezifische Gasdynamik, die auf die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff zurückzuführen ist.

Vor diesem Hintergrund wurden erweiterte physikalische Modelle sowie zusätzliche Ein- und Ausgabeparameter für PRIME 3D® definiert und implementiert. Hierzu gehören Modelle zur

- dynamischen Berechnung der Gaskonstanten für die Gasflussmodellierung,
- Bewertung der Schmierölbewegung und des daraus abgeleiteten Risikos für ölinduzierte Vorentflammung,
- Bewertung des Transports von Wasserstoff in das Kurbelgehäuse,
- besseren Beschreibung der Flankenabdichtung für größere (maritime) Kolbenringdurchmesser,

sowie zugehöriges Pre- und Post-Processing.

Für die H₂-spezifischen Optimierung der Kolbenringpakete der Versuchsmotoren 35/44 DF und 35/44 GTS (MF) erfolgte zunächst, parallel zur Erweiterung der Ringdynamik-Software, die Bewertung der jeweiligen Serien-Ringpakete auf Basis gemessenen CH₄-Randbedingungen (DF) bzw. simulierten H₂-Randbedingungen (MF). Als ersten Optimierungsschritt wurde das Ringpaket für den 35/44 DF auf minimalen Reverse-Gas-Flow aus dem Ringpaket in den Brennraum ausgelegt. Hier konnte eine Reduktion um 60 % erzielt werden.

Eine Optimierung der Ringpakete auf H₂-Motorbetrieb erfolgt auf Basis neuer PRIME 3D® Berechnungsmodelle aus weiteren Kalibrierungen bei realem H₂-Motorbetrieb. In gleicher Weise erfolgt die Bewertung eines neuartigen 4 Ring-Systems unter H₂-Verbrennungsbedingungen.

Bewertung des tribologischen Verhaltens von Kolbenringen

Die Tribologie des Systems Kolbenring-Schmieröl-Zylinderlauffläche wird bei der H₂-Verbrennung potentiell durch veränderte Ölaltrung und Vermischung mit kondensiertem Wasser beeinflusst. Der Wassereinfluss wurde außermotorisch mit einem Komponenten-

prüfstand untersucht. Referenzdatensätze für Reibung, Verschleiß und Fressbeständigkeit wurden für verschiedene, gängige Motoröle für mittelschnellaufende Gas- und Dieselmotoren ermittelt, wobei eine Ölvariante ein additivierter Ester war. Die Kolbenringbeschichtungen waren galvanisch abgeschiedene Chrom-Keramik (CKS) sowie zwei thermische Spritzschichten auf Mo- und Fe-Basis mit Karbidverstärkung als Cr(VI)-freie, REACH-konforme Beschichtungsalternativen.

Die Ergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit der tribologischen Eigenschaften von der Viskosität, verschleißmindernden Hochdruckadditiven und dem Beschichtungsmaterial. Beste Ergebnisse zeigen das Dieselöl Shell Argina S3 40 und der Esterschmierstoff WCI Ecosyn GE 4004. Wassereinfluss wurde in Einzelversuchen für verschiedene Wassergehalte 5 – 50 % untersucht, wobei signifikante Unterschiede zur Referenzmessung erst ab 20 % auftreten. Diese Konzentration wurde daher für den Vergleichsdatensatz verwendet, und es wurden nur die beiden genannten Schmierstoffe berücksichtigt. Die Wasserbeimengung verändert die Viskosität und reduziert die Additivkonzentration, was zumeist zu erhöhtem Linerverschleiß bei reduziertem Reibbeiwert führt. Die Beschichtungen verhalten sich unterschiedlich. CKS und die Fe-basierte HVOF-Spritzschicht zeigen keinen erhöhten Ringverschleiß, während dieser für die Mo-basierte Plasmaspritzschicht ansteigt. Weitere Untersuchungen zur Tribofilmbildung und Schmierstoffalterung sind geplant.

3. Prüfstandsbetrieb

In Tab. 1 sind die wichtigsten Motorkenngrößen der 1-Zylinder Motorprüfstände dargestellt.

Tab. 1: Motorparameter der Einzylinder-Forschungsmotoren 1L35/44 und 1L32/44

Parameter	Einheit	1L35/44 G TS	1L32/44
Kolbenhub	mm	440	440
Zylinderbohrung	mm	350	320
Zylinderanzahl	-	1	1
Hubvolumen	dm ³	42,3	38,4
Nenndrehzahl	min-1	750	750
Zündsystem	-	SI	DF
H ₂ -Einblasung	-	PFI / DI	PFI
Verdichtungsverhältnis	-	Variabel	Variabel
Nockenwelle	-	Variabel	Variabel

Optikuntersuchungen 1L35/44 PFI

Die Untersuchungen am mittelschnelllaufenden Einzylinderforschungsmotor mit einer Bohrung von 350 mm und einem Hub von 440 mm werden in der Monofuel-Konfiguration mit Saugrohr-einblasung auch optisch begleitet. Minimalinvasive Modifikationen ermöglichen endoskopische Einblicke im sichtbaren und ultravioletten Lichtspektrum in Form von natürlicher Verbrennungslumineszenz und OH*-Chemilumineszenz. Der optische Einblick dient zur Auflösung des zeitlich-räumlichen Auftretens von Abnormalen Verbrennungsevents, welche sich am untersuchten Mittelschnellläufer durch Vorentflammungen vor dem Zündzeitpunkt äußern. Insbesondere Backfire-Anomalien konnten beobachtet werden,

welche den Kern der Untersuchungen und der Auswertung bilden. Mittels Highspeed Aufnahmen mit Bildraten von 9 kHz wird der Brennraum aus zwei Perspektiven (jeweils aus Sicht zwischen den Einlass (Inlet valves, IVs)- und Auslassventilen(Exhaust valves, EVs))) mit einem Neigungswinkel von 23° zum Zylinderdach abgebildet. Eine schematische Darstellung des optischen Aufbaus, sowie exemplarische Sichtfelder (Field of Views, FOV) sind in Abb. 4 dargestellt.

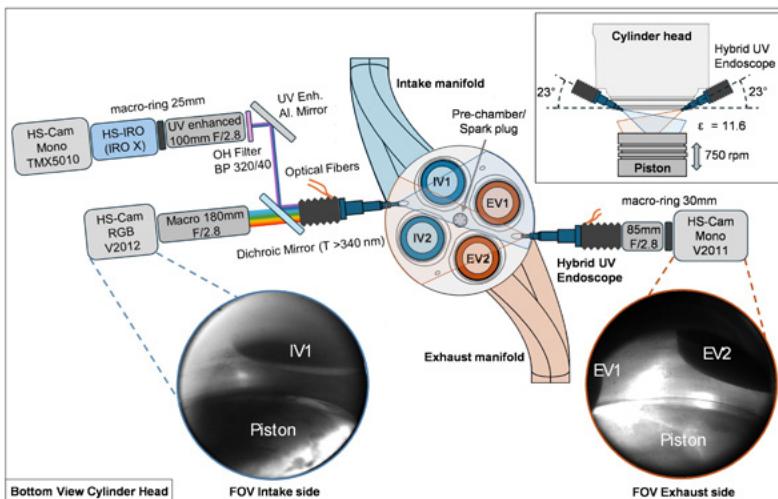


Abb. 4: Schematischer Messaufbau am Mittelschnellläufer mit exemplarischen Sichtbereichen. (IV = Einlassventil (engl. Intake valve); EV = Auslassventil (engl. Exhaust valve)) [2]

Mit Hilfe eines Ringspeichers konnten bei gefahrenen Lastrampen mit konstanter Steigung reguläre und anomaliebehaftete Arbeitsspiele rückwirkend gespeichert und den thermodynamischen Motordaten zugeordnet werden. Die schematische Messmethodik ist in Abb. 5 zu finden. Nach Aufnahme der Bilddaten erfolgt ein Post-Processing, welches die Farbzuzuordnung mit anschließendem Vibrationsausgleich beinhaltet. Eine intensitätsbasierte Objektdetektierung in den kurbelwinkelaufgelösten Aufnahmen führt zur Lokalisierung der Vorentflammungsphänomene in den FOVs.

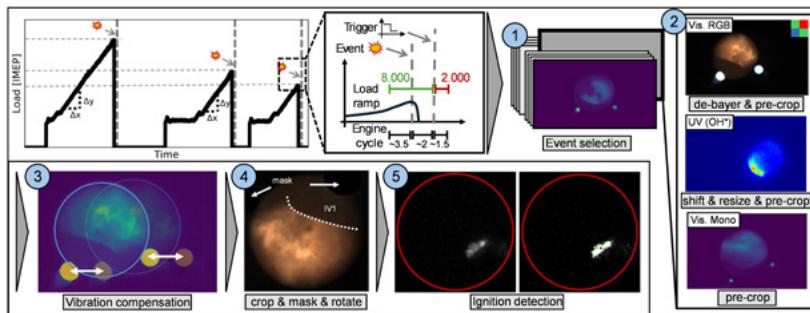


Abb. 5: Messmethode der gefahrenen Lastrampen und Post-Processing Schritte der optischen Daten zur Objektdetektion [3]

Die Messungen umfassen diverse Parametervariationen, welche in Tab. 2 gelistet sind.

Tab. 2: In der Messkampagne betrachtete Parametervariationen

Verbrennungsluftverhältnis λ (Air-Fuel Ratio) [-]	2,3 – 4,0
Maximale Lastlevels pmi [bar]	8 – 20
Schwerpunkt EU50 [$^{\circ}$ KW nZOT]	0 – 16
Öltemperatur [$^{\circ}$ C]	65 – 75
Kühlwassertemperatur [$^{\circ}$ C]	90 – 98
Ladelufttemperatur [$^{\circ}$ C]	50 – 70

Eine räumliche Übersicht der Verbrennungsursprünge über alle Parametervariationen ist in Abb. 6 zu finden.

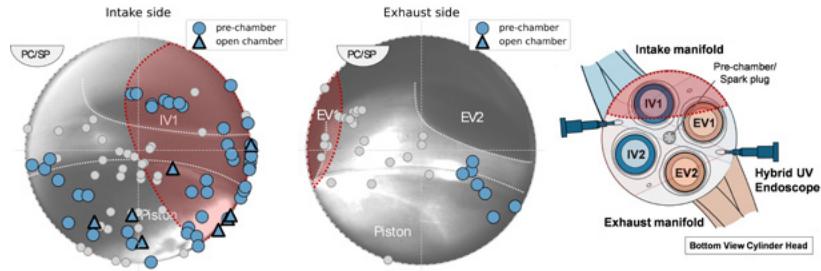


Abb. 6: Überblick der initialen Entzündungen aller Backfire Events mit lokaler Anhäufung bei IV1 [3]

Die blauen Scatterpunkte symbolisieren die Erstdetektion einer Vorentflammung in einer der verwendeten Kameras, welche durch die noch geöffneten Einlassventile zum Backfire führt. Die grauen Punkte zeigen die Positionen der ersten Detektion in den jeweils anderen Kameras oder in der andren Perspektive. Die im Hintergrund liegenden Bilder dienen dabei als Referenz und Orientierung im FOV. Die eingezeichnete rote Zone weist eine Ansammlung an Verbrennungsursprüngen rund um das Einlassventil IV1 auf, welches gegenüber dem IV2 durch die seitlich kommende Ansaugstrecke einen kürzeren Ansaugtrakt besitzt. Da dieses Verhalten im Gesamtbild aller Parametervariationen zu sehen ist, lässt sich der Ursprung auf die Geometrie der Ansaugstrecke und des Saugrohrinjektors zurückführen. Eine lokale Anfettung im frühen Ladungswechsel ausgehend vom IV1 stellt eine inhomogene Ladung dar. 3D-CFD Simulationen unterstützen die Aussage. Ein zeitlich ungleichmäßiger Eintritt des Wasserstoffs durch IV1 und IV2 zeigen die lokalen fetteren Zonen, welche sich erst bei -260°KW vZOT auflösen.

Die Auslöser der abnormalen Verbrennungen lassen sich aus den optischen Aufnahmen und der Simulation auf heiße Restgaszonen, welche bis -300 - (-290) °KW vZOT lokal auftreten, und die Präsenz von Schmieröl im Brennraum zurückführen. Die heißen Restgase äußern sich durch rapide Intensitätsanstiege, vor allem bei der Aufnahme der OH*-Radikale. Verbrennungsursprünge nahe des

Kolbenrandes und thermische Inkandeszenz im Wellenlängenbereich von 550-650 nm weisen auf öl- oder ölnebelbedingte Schwarzkörperstrahlung hin.

Das stärkste parameterabhängige Verhalten der Backfire-Ursprünge ist bei der Last selbst zu erkennen. Mit steigender Last scheinen sich die Anomalieursprünge im Brennraum zu verteilen. Dieses Verhalten, welches in Abb. 7 gezeigt ist, lässt sich mit der stärkeren Vermischung durch ansteigende Turbulenz begründen.

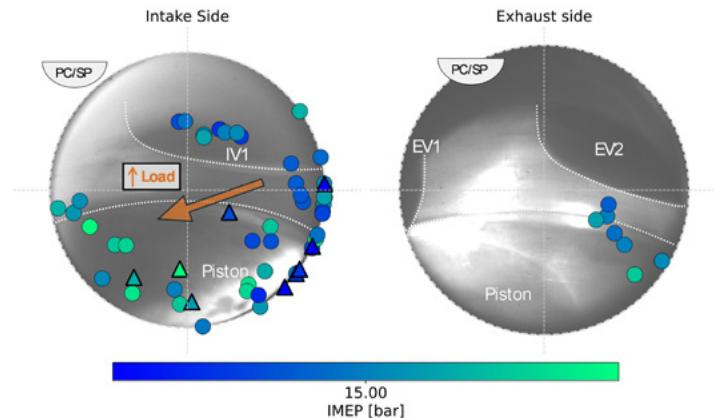


Abb. 7: Verteilung der lastabhängigen Backfire Ursprünge [3]

Für den weiteren Prozess in den Untersuchungen und der Entwicklung gilt es die Gemischbildung in der frühen Gasphase weiter zu homogenisieren. Dazu werden durch 3D-CFD Simulationen Saugrohrinjektoren mit angepasster Position und Orientierung betrachtet und anschließen experimentell am Prüfstand überprüft. Zusätzlich gilt es das Kolbenringpaket und die Tribologie zu optimieren, um den aus den optischen Aufnahmen ersichtlichen Öleintrag und somit die Zündherde zu reduzieren.

Sicherheitskonzept 1L35/44G TS DI

Auf Grund der besonderen Brennstoffeigenschaften von Wasserstoff sowie durch das Verbrennungskonzept der Wasserstoffdirekteinspritzung musste das Sicherheitskonzept des 1-Zylindermotoren-

prüfstand entsprechend adaptiert werden, um einen sicheren Versuchsbetrieb zu realisieren.

Der Hauptfokus des Sicherheitskonzeptes ist die Reduzierung eines übermäßigen H₂-Eintrag in den Brennraum und die umliegenden Teilsysteme wie Abgasleitung, Ladeluftleitung sowie die Prüfstands zelle. Dies wird über eine adaptierte H₂-Zulaufleitung zum Injektor erreicht, in die kurz vor Injektor ein komplexer Sicherheitsanbau integriert worden ist, (siehe Abb. 8). Der Sicherheitsanbau, bestehend aus ansteuerbarem Window Valve, Rückschlagventil und Berstscheibe wurde simulativ auf eine minimalste mögliche H₂-Menge im Fehlerfall ausgelegt.

Zusätzlich wurde über geeignete Sensorik, eine schnelle Datener fassung und Verarbeitung sichergestellt, dass ein Versagen des Injektors spätestens im nächsten Zyklus detektiert werden kann und die Schnellabschaltung der H₂-Versorgung erfolgt.

So werden hohe Explosionsdrücke durch eine mögliche Detonation im Fehlerfall vermieden.

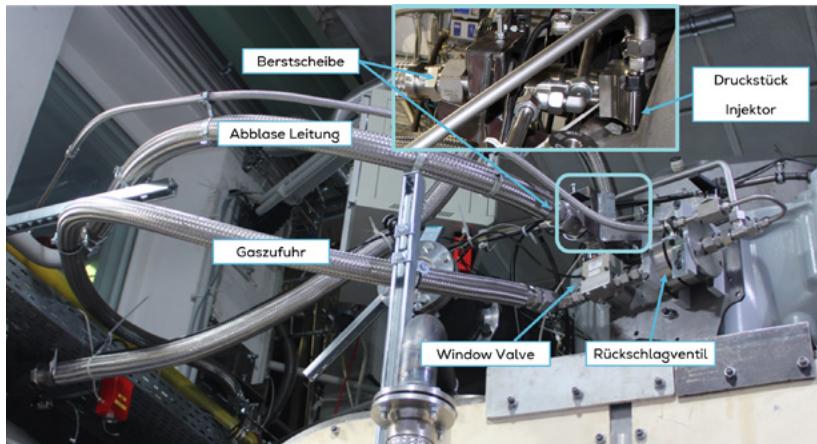
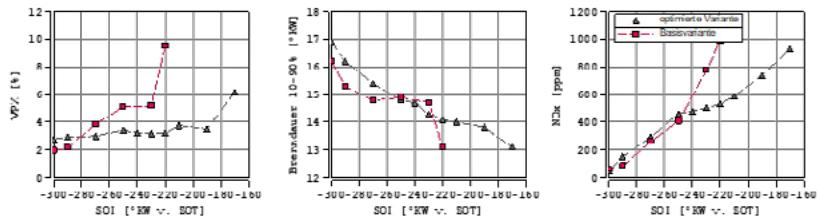


Abb. 8: Prüfstandsaufbau mit H₂-Zulaufleitungen und Sicherheitseinrichtung für den für den H₂ DI-Betrieb am 1L35/44

Thermodynamische Untersuchungen 1L35/44

In Abb. 9 ist ein Vergleich der in Kapitel 2 mit CFD-Methoden entwickelten Kappengeometrien über einer Variation des Einblaszeitpunktes bei konstanter Last dargestellt. Zu erkennen ist, dass die beiden Designs sich im saugsynchronen Betrieb noch sehr vergleichbar verhalten. Je später die Einblasung erfolgt, desto größer ist der Einfluss der Einblasegeometrie auf die Gemischhomogenität. Ab einem Einblasezeitpunkt von 250°KW v. ZOT steigen die NOx-Emissionen sowie die zyklischen Schwankungen des Spitzendrucks der Basisvariante stark an. Weiterhin bietet das optimierte Design deutliche Vorteile in dem Verstellbereich der Wasserstoffdirekteinblasung durch die verbesserte Gemischhomogenität. Die Basisvariante konnte in dem Lastpunkt bei Einblasetimings nach 220°KW v. ZOT auf Grund Anomalien nicht mehr betrieben werden.



Thermodynamische Untersuchungen Retrofit Medium Speed Motor am 1L32/44

Ein weiteres Unterarbeitspaket innerhalb des Forschungsvorhabens war die thermodynamische Untersuchung zum Retrofit bestehender Motoren. Dabei konnte gezeigt werden, dass ein seriennaher Medium-Speed-Motor im Diesel-Setup mit hohem Verdichtungsverhältnis und großer Ventilüberschneidung zuverlässig und effizient unter Zumischung von Wasserstoff betrieben werden kann (siehe Abb. 10).

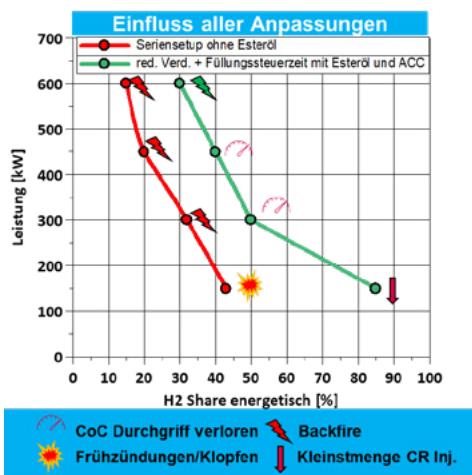


Abb. 10: Maximal Erreichbare Substitution in Abhängigkeit Motorlast (Eigene Darstellung mit Daten aus [4])

Bezüglich der maximalen energetischen Zumischraten von Wasserstoff konnten bis zu 85 % bei einer spezifischen Leistung von 150 kW pro Zylinder und bis zu 30 % bei 600 kW pro Zylinder erreicht werden. Dabei wird die Zumischung im unteren Teillastbereich je nach Konzept der Motorregelung durch zwei unterschiedliche Mechanismen begrenzt. Bei Anwendung einer konventionellen Motorregelung, ohne Verbrennungsregelung, führt die erhöhte Brenngeschwindigkeit von Wasserstoff zu einer Frühverschiebung der Verbrennung, welche zum Erreichen der Klopfgrenze führt. Dies ist auf den konstanten Einspritzzeitpunkt der Dieseleinspritzung

zurückzuführen. Die maximale Zumischrate von Wasserstoff ist dabei auf 42 % begrenzt. Bei Anwendung einer intelligenten Motorregelung mit Verbrennungsregler kann der Wasserstoff Anteil auf bis zu 85 % angehoben werden. Hierbei begrenzt die minimale Einspritzmenge des verwendeten Dieselinjektors die Substitutionsrate. Dies resultiert aus dem Sachverhalt, dass stets eine minimale Dieselmenge eingespritzt werden muss, welche sich relativ zur Motorlast signifikant auf den energetischen Brennstoffanteil auswirkt. In der Vollast verhindert primär das Auftreten von Backfire höhere Wasserstoff-Substitutionsraten.

Je nach Zumischrate findet die Verbrennung in unterschiedlichen Betriebsregimen statt. Bei geringen Zumischraten (< 30 % Wasserstoffanteil) erfolgt die Verbrennung im Co-firing-Betrieb. Dieser ist durch Umsetzungsgrade von ca. 87 % gekennzeichnet. Im Gegensatz dazu findet bei höheren Substitutionsraten ein reiner Otto-Betrieb statt, in welchem der Umsetzungsgrad des Wasserstoffs ca. 97 % beträgt. Der Übergang beider Bereiche wird primär durch das globale Luft-Kraftstoffverhältnis des Wasserstoffs definiert.

Bei mittleren und hohen Lasten steigen die NO_x-Emissionen sowie der maximale Zylinderdruck im Vergleich zum reinen Dieselbetrieb. Dies ist auf die bereits genannte Zunahme der Verbrennungsgeschwindigkeit, infolge der hohen Reaktivität des beigemischten Wasserstoffs zurückzuführen. Als entscheidender Faktor zur Erhöhung der Wasserstoffsubstitutionsrate konnte der Einsatz alternativer Schmieröle festgestellt werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde dazu Esteröl verwendet. Infolge des höheren Flammpunkts findet eine Verschiebung der Entstehung ölinduzierter Zündquellen, hin zu höheren Lasten statt.

Zur weiteren Optimierung des Betriebs, insbesondere der Erhöhung der maximalen Substitutionsrate, ist eine Reduzierung des Verdichtungsverhältnisses sowie eine flexible Anpassung der Steuerzeiten über eine variable Ventilsteuering (VVT) je nach Anforderung sinnvoll, da hierdurch eine Anpassung der thermodynamischen Randbedingungen an die hohe Reaktivität von Wasserstoff ermöglicht wird.

4. Wirtschaftliche Verwertung und Ausblick

Der erfolgreiche Abschluss des Forschungsprojekts ermöglicht Tenneco ein detaillierteres Verständnis von Einflussgrößen und Abhängigkeiten der Auslegung des Gesamtsystems Wasserstoffmotor auf das Power Zylinder System mit seinen Komponenten Kolbenringe und Zündkerzen. Dieses Verständnis wird in weiterführenden Projekten als Grundlage für zukünftige Entwicklungen emissionsfreier Antriebstechnologien genutzt. Damit wird für Tenneco die Basis geschaffen, über die Projektlaufzeit hinaus kontinuierlich an Komponenten für die Effizienzsteigerung von Wasserstoffmotoren zu arbeiten. Dies bildet die Voraussetzung auch langfristig einen wissenschaftlichen und technischen Vorsprung gegenüber ausländischen Wettbewerbern aufrecht zu erhalten. Die weiterhin hohe Bedeutung des de-fossilisierten Verbrennungsmotors als Antriebskonzept für große Industriemotoren im Marktsegment der Schiffsanwendung und der hohe Marktanteil von Tenneco in diesem Marktsegment ermöglichen eine flächendeckende Umsetzung der im Rahmen des Projektes erarbeiteten Maßnahmen an Kolbenringen und Zündkerzen für industrielle Anwendungen.

Die Erkenntnisse aus diesem Projekt bietet die strategische Möglichkeit, zukünftige Motorkonzepte mit Wasserstoff am Standort Augsburg bei Everllence unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Im Rahmen der bisherigen Arbeiten konnten zielführende Brennverfahren identifiziert werden, die eine vielversprechende Grundlage für die Entwicklung eines wasserstoffbasierten Schiffs-motors darstellen. Um diesen Entwicklungsschritt erfolgreich umzusetzen, sind weitere Versuchsreihen auch über die Projektlaufzeit hinweg erforderlich.

Die hohe Komplexität des Wasserstoff-Brennverfahrens macht den Einsatz spezialisierter Infrastruktur unabdingbar. Diese wird gezielt genutzt, um ein technologisch und sicherheitstechnisch geeignetes Produkt zu entwickeln, das den Anforderungen des maritimen Einsatzes gerecht wird. Ein zentraler Bestandteil der Entwicklungsarbeit war die Konstruktion und Optimierung eines direkteinbla-

senden Injektors. Durch dessen systematische Weiterentwicklung konnten entscheidende Erkenntnisse über die mechanische und funktionale Auslegung dieser Schlüsselkomponente gewonnen werden. Diese Ergebnisse eröffnen potenziell neue Marktchancen, insbesondere im Hinblick auf die Bereitstellung technologischer Lösungen für zukünftige Anwendungen.

Darüber hinaus wurden wichtige Erkenntnisse zur Absicherung von Fehlerfällen im Umgang mit Wasserstoff gesammelt. Diese fließen direkt in die Produktentwicklung ein und tragen wesentlich zur Erhöhung der Betriebssicherheit bei. Insgesamt schafft das Projekt eine belastbare Grundlage für die Entwicklung emissionsfreier und leistungsfähiger Wasserstoffmotoren im maritimen Sektor.

Abkürzungsverzeichnis

DF	Dual Fuel
SI	Spark-Ignition
CoC	Center of Combustion
ZOT	Zünd-Oberer Totpunkt
SOI	Start of Injection
CR	Common-Rail
MF	Mono Fuel
VPX	Variationskoeffizient Maximaldruck

Literatur

[1] IMO. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/mepc-80.aspx..>

[2] S. O. Deist, W. Dürrholder, D. Winkler, K. Mahler, M. Prager, and M. Jaensch, „Optical visualization of performance limiting combustion phenomena in marine and stationary hydrogen engines,“ CIMAC World Congress 2025, 2025.

[3] S. O. Deist, A. Zepf, D. Winkler, K. Mahler, M. Prager, and M. Jaensch, „Endoscopic visualization of backfire behavior in a medium speed maritime hydrogen engine,“ International Journal of Hydrogen Energy, vol. 169, p. 150938, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.150938.

[4] T. Achenbach, R. Meinert, K. Mahler, C. Kunkel, S. Rösler, M. Prager, M. Jaensch, „Influence of Lubrication Oil on Hydrogen Fuel-Share Combustion in a Conventional Medium-Speed Marine Diesel Engine [Im Druck],“ SAE Technical Papers 2025

03SX572

BATMAN+

Batterieauslegung mittels MC-Simulation des Anlagenverhaltens 4.0

Autorenliste

Technische Universität Hamburg

Stefan Krüger

Johannes Oettle

Christian Emmersberger

FSG NOBISKRUG DESIGN GmbH

Adele Lübcke

Steffen Schuetze

Felix Michaelis



Problemstellung und Kurzbeschreibung des Vorhabens

Batterieantriebe werden als wesentliches Element für eine zukünftige grüne Schifffahrt angesehen. Die Schiffe können bei Revierfahrt und im Hafen emissionsfrei betrieben werden, wenn die Energieerzeugung über die Batterien erfolgt. Gleichzeitig können die Batterien Spitzenleistungen abpuffern und ermöglichen so den Einbau von Primärenergieerzeugern mit geringerer Leistung. Wenn die Lade- und Entladezyklen der Batterien sinnvoll mit dem Power-managementsystem verknüpft werden, kann der Betrieb der Generatoren im ungünstigen Teillastbereich vermieden, und damit weiter Brennstoff gespart und Emissionen vermieden werden. Damit wird ein wesentlicher Beitrag zum maritimen Umweltschutz geleistet.

Das Problem besteht darin, die jeweils benötigte Batteriekapazität sowie die Anbindung des Batteriepaktes in das Power-Management-System zuverlässig vorhersagen zu können. Wenn der emissionsfreie Betrieb des Schiffes im Hafen und bei Revierfahrt allein mit den Batterien erfolgen soll, dann muss zwangsläufig gegen Ende jeder Reise eine Mindestenergiemenge im Batteriesystem gespeichert sein, denn sonst ist das nicht möglich. Gerade diese Forderung nach einer Mindestenergiemenge am Ende der Reise ist aber das zentrale theoretische Problem bei der Systemauslegung, weil sich diese aufgrund der Vorgeschichte der Reise und die dabei mögliche Lade / Entladezyklen ergibt. Dies ist das eigentlich Neue an dem Vorhaben, und das Problem ergab sich allein aus dem zu erreichenden emissionsfreien Betrieb. Zur Lösung des Problems wurde nicht nur eine exakte und hinreichend fein aufgelöste Langzeitergiebedarfsrechnung implementiert, sondern es mussten auch zeitabhängige Lade- und Entladezyklen auf theoretischem Wege vorab bestimmt werden, weil davon das Power-Managementsystem und der Betrieb der Generatoren abhängt. Dabei gingen die Antragsteller während des Vorhabens von zwei Szenarien aus: Aufgrund der vorhandenen Batteriekapazitäten und auch Preise, eignen sich batteriestützte Zusatzantriebe derzeit vor allem für solche Schiffe, die auf festen Routen fahren und für die ein Fahrprofil mit hinreichender Zuverlässigkeit bestimmt werden kann. Das sind zunächst

Schiffe in der küstennahen Fahrt, für die umweltfreundliche Antriebe grundsätzlich attraktiv sind, weil sie oft in besonders sensiblen Bereichen fahren. Auch moderne Yachten setzen zunehmend auf Batterielösungen, um Vorteile in attraktiven Häfen zu erlangen, z.B. bessere Liegeplätze. Daher konzentrierte sich das Vorhaben zunächst auf solche Neubauten. Im Verlaufe des Vorhabens wurde dann das Auslegungsverfahren verallgemeinert, um auch andere Schiffstypen zu erfassen. Eine zusätzliche Landstromversorgung wurde dann auch mit in Betracht gezogen. Zu den Unbekannten kommt nicht nur der geforderte Mindestladezustand am Ende der Reise hinzu, sondern auch ein Anfangsladezustand zu einem beliebigen Startpunkt der Reise. Das Vorhaben wurde in folgende Teilkäpfe zerlegt: Zunächst musste eine statistische Langzeit-Energiebedarfsermittlung mittels numerischer Simulationen des Schiffes auf seiner Route implementiert werden. Aufgrund dieser Energiebedarfsrechnung konnten dann die Auslegung der einzelnen Anlagenkomponenten und der Entwurf des Power-Managementsystems erfolgen. Daraus ergab sich dann der einzuhaltende Mindestladestand am Ende der Reise. Anschließend musste es möglich gemacht werden, für gezielt vorgegebene Szenarien das System zu simulieren und bezüglich seiner Funktionalität überprüft werden zu können. Daraus mussten Anweisungen für die Besatzung entwickelt werden, wie das Schiff im Einzelfall zu betreiben ist. Das Vorhaben war technisch und wissenschaftlich anspruchsvoll und leistete sowohl einen Beitrag zu Verbesserung des maritimen Umweltschutzes als auch zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Antragsteller. Gleichzeitig war das Vorhaben neuartig, weil eine solche Gesamtsystembetrachtung mit dem Ziel des emissionsfreien Teilbetriebes allein mit Batterien bisher für küstennah fahrende Schiffe noch nicht erfolgt ist.

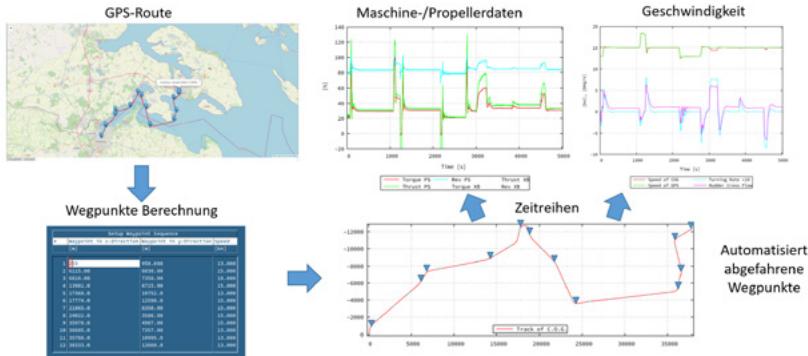


Abb. 1: Die einzelnen Bausteine des Vorhabens BATMAN+

Vorhabenziele und Aufstellung des Konsortiums

Die Neuausrichtung der maritimen Industrie in Deutschland hat sich im Wesentlichen auf komplexe Spezialschiffe konzentriert. Dieser Entwicklung trug die Neuausrichtung des Maritimen Forschungsprogrammes ausdrücklich Rechnung. Wesentliche Querschnittsthemen des neuen Maritimen Forschungsprogrammes sind:

- Maritimer Umweltschutz
- Intelligente Produkte
- Digitalisierung (Industrie 4.0).

Zentraler Baustein der maritimen Energiewende müssen neue Antriebstechnologien sein. Dabei kommt der Batterietechnik derzeit noch eine Brückenfunktion zu, aber möglicherweise wird sich die Leistungsfähigkeit solcher Systeme in Zukunft erheblich erhöhen, so dass sie nach und nach konventionelle Antriebe (möglicherweise in Kombination mit Brennstoffzellen) ersetzen könnten. Trotzdem wird es unumgänglich sein, weiterhin massiv den für den Schiffsbetrieb nötigen Energiebedarf zu senken, denn solche Systeme haben gegenüber konventionellen Kraftstoffen einen deutlich

geringeren Energieinhalt und sind zugleich sehr teuer. Die Antragsteller sehen das größte Einsparpotenzial aus schiffbaulicher Sicht in der Optimierung des Schiffsbetriebes, wenn das Schiff und seine Systeme gleichzeitig optimal auf die zu erwartenden Einsatzszenarien hin entwickelt werden. Das erfordert den massiven und intelligenten Einsatz von numerischen Simulationsverfahren, die auf digitalen Modellen von Schiff und Antriebsanlage aufsetzen müssen. Damit verfolgte das Vorhaben auch ausdrücklich das Ziel, durch IT-basierte Lösungen, Prozesse und Produkte neu aufzusetzen. Genau das ist der Kerngedanke des Querschnittsthemas Digitalisierung im Maritimen Forschungsprogramm. Kernelemente des Vorhabens sind die folgenden drei Grundlagenentwicklungen gewesen:

1. Langzeitenergiebedarfsermittlung durch Kombination von Statistik und Routenoptimierung: Das Problem besteht darin, dass der Betriebsmodus des Systems vom aktuellen Ladezustand der Batterie abhängt. Dieser ist aber abhängig von vorangegangenen Betriebszuständen. Weiterhin bestimmt der aktuelle Ladezustand der Batterie zukünftige Betriebszustände und beeinflusst damit den momentanen Betriebszustand. Es war also sowohl eine Vorwärts- als auch eine Rückwärtskopplung einzelner Betriebszustände an andere zu modellieren. Andererseits wird der momentane Betriebszustand auch erheblich von statistischen Größen bestimmt, z. B. durch die Umweltbedingungen. Daneben treten im Schiffsbetrieb erhebliche kurzfristige Lastspitzen auf, die einen großen Einfluss auf den momentanen Ladezustand der Batterie haben. Alle diese Effekte mussten bei der Langzeitenergiebedarfsermittlung berücksichtigt werden. Daraus ergab sich, dass das Problem nur durch eine Kombination von Monte-Carlo-Simulationen (Umweltbedingungen, Ladezustand) mit einer deterministischen Routenoptimierung gelöst werden konnte. Nach Kenntnis der Antragsteller ist das bisher so noch an keiner Stelle gemacht worden.
2. Anlagenauslegung und Optimierung des Power-Management-systems: Die Ergebnisse der Langzeitenergiebedarfsermittlung mündeten in eine Vielzahl von Zeitreihen des jeweils benötigten

Drehmoments, der Drehzahlen und Propellersteigungen. Diese Daten konnten dann im Nachgang zugrunde gelegt werden, um die Anlage auszulegen. Das betraf im Wesentlichen Anzahl und Leistung der Generatoren sowie die Kapazität des Batteriesystems. Gleichzeitig mit der Systemauslegung musste der Entwurf des Power-Managementsystems erfolgen, das festlegt, wie viele der Generatoren gerade in welchen Arbeitspunkten betrieben werden und wieviel Energie gerade in das Batteriesystem eingebracht oder von diesem entnommen wird. Das Vorhaben war dabei bewusst so angelegt worden, dass zwischen diesem und dem ersten Schritt keine Rückkopplung angenommen wurde, um den iterativen Entwurf der Anlage noch ermöglichen zu können. Als Ergebnis dieses Schrittes wurden die wichtigsten Parameter der Antriebsanlage sowie die Konfiguration des Power-Managementsystems ermittelt.

3. Gesamtsimulation ausgewählter Szenarien im Zeitbereich und Fahrweisungen: Nachdem die Anlagenkomponenten und das Power-Managementsystem aufgrund des statistischen Langzeitenergiebedarfes ausgelegt wurden, musste das Gesamtsystem mittels numerischer Simulation im Zeitbereich überprüft werden. Dazu wurden Zeitreihen für ausgewählte Situationen nachgerechnet. Damit konnte das entwickelte System validiert werden.

Um die genannten Grundlagenentwicklungen nach Abschluss des Vorhabens für die industrielle Praxis nutzbar zu machen und daraus Wettbewerbsvorteile ziehen zu können, hatten sich die Vorhabenpartner zusammengefunden, um genau eine solche Entwicklung im Rahmen dieses Vorhabens durchzuführen, und zwar mit Blick auf die jeweils vertretene Produktpalette. Daraus ergaben sich die folgenden partnerspezifischen Vorhabenziele:

Die Vorhabenpartner setzen derzeit für schiffstheoretische Berechnungen das Entwurfssystem E4/SESIS ein, auf dessen Grundlage die Entwicklung stattgefunden hat. Die Vorhabenpartner nutzen also die gleiche Berechnungs- und Entwicklungsplattform, sie haben aber

naturgemäß unterschiedliche Entwicklungsziele, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

FSG-Nobiskrug beschäftigt sich mit der Entwicklung von Spezialschiffen aller Art, insbesondere RoRo-Schiffe und auch Fahrgastschiffe für die küstennahe Fahrt. In einem aktuellen Neubauprojekt realisiert FSG-Nobiskrug eine RoRo-Fähre mit LNG-Antrieb sowie mehrere Yachten, auf denen Batteriesysteme zum Einsatz kommen sollen. Es ist aus Sicht von FSG-Nobiskrug erkennbar, dass Batteriespeichersysteme zukünftig eine wichtige Rolle spielen werden, um den Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen voranzubringen. Aus diesem Bedarf ist die Idee für das Vorhaben entstanden, weil seinerzeit keine gesicherten theoretischen Grundlagen vorhanden waren, um solche Systeme auslegen zu können. Weil aus Sicht von FSG-Nobiskrug auch ein gewisser Bedarf nach Nachrüstungen von solchen Speichersystemen besteht, wird sich auch daraus ein weiteres Geschäftsfeld entwickeln.

Die TU-Hamburg beschäftigt sich seit langem mit der Entwicklung von numerischen Methoden für den Entwurf von Schiffen. Dazu gehört auch das Manövrierverhalten von Schiffen und die Vorhersage und Bewertung von Schiffsentwürfen auf statistischer Basis. Die TU-Hamburg hat die wesentlichen Grundlagenarbeiten innerhalb des Vorhabens durchgeführt und dabei die Entwicklungen in Abstimmung mit FSG-Nobiskrug technisch so koordiniert, dass am Ende ein leistungsfähiges Gesamtpaket entstanden ist. Die TU-Hamburg übernimmt als neutrale Organisation die Pflege und Distribution der entwickelten Methoden, die innerhalb des Softwarepaketes E4/SESSIS durchgeführt werden.

Struktur des Vorhabens und Arbeitspakete

Die durchzuführenden Arbeiten lassen sich gemäß Abb. 2 in einer Matrix-Struktur darstellen: Einmal wurden die technischen Themenblöcke Energiebedarfsstatistik, Anlagenkonzeption sowie Kontrolle

und Bedienung als zentrale Forschungsfelder identifiziert. Das sind die Themenfelder, auf denen methodische Defizite durch die Antragsteller identifiziert wurden. Die zu bearbeitenden Querschnittsthemen gliederten sich in Statistische Modellierung Fahrtgebiet, Spitzenlasten und Routenoptimierung, Statistikbasierte Anlagenauslegung sowie Digitale Gesamtsystemsimulation.

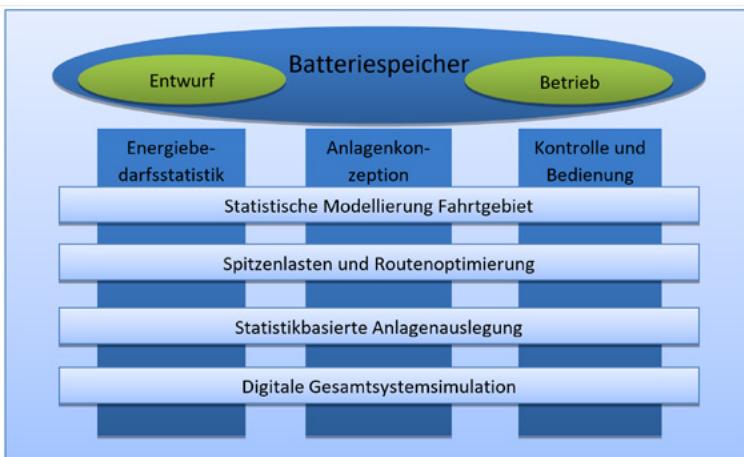


Abb. 2: Matrix-Struktur des Vorhabens

Aus den identifizierten Querschnittsthemen ergaben sich die einzelnen Arbeitspakete des Vorhabens mit den Teilaufgaben, die implementiert und in das offene Methodenbanksystem integriert werden mussten, wie folgt:

AP 1: Statistische Modellierung Fahrtgebiet
(Koordination: TU-Hamburg)

- Erweiterung der bisherigen Methode für Flachwasser und Seegang
- Implementierung eines neuen Verfahrens zur Driftkraftberechnung bei kurzen Wellen
- Einpflegen der bekannten Betriebsprofile in die bisherige Methode
- Anbindung der Monte-Carlo-Simulation an eine Zeitbereichsrechnung

AP 2: Spitzenlasten und Routenoptimierung (Koordination: TU-Hamburg)

- Modellierung von DP-Vorgängen beim Anlegen
- Modellierung von Ausweichmanövern
- Segmentierung der Fahrtroute
- Modellierung des Bordnetzes
- Bestimmung der Geschwindigkeit und des Energiebedarfs durch Optimierung
- Implementation und Testen verschiedener Optimierungsziele
- Berechnen des Langzeitenergiebedarfs
- Validieren des prognostizierten Energiebedarfes

AP 3: Statistikbasierte Anlagenauslegung (Koordination FSG)

- Statische Komponentenauswahl
- Überprüfung des Batteriepaketes
- Ausfallwahrscheinlichkeiten
- Entwicklung und Optimierung Power-Management-System
- Erweiterung der Simulationsverfahren für Landstromanbindung
- Auswahl kritischer Reisen

AP 4: Digitale Gesamtsystemsimulation (Koordination FSG)

- Erweiterung der Kurshaltemethode
- Zeitreihengenerierung für ausgewählte kritische Reisen
- Systemanalyse und Fahrtempfehlungen
- Erarbeitung eines Betriebsmanuals
- Validierung der Zeitreihen

Die einzelnen Arbeitspakete aus dem Arbeitsplan des Vorhabens führten zu folgenden Entwicklungen:

- Erweiterung der Datenbasis des Systems für die Beschreibung der neuen Komponenten

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

Im Folgenden werden einige Entwicklungen beispielhaft vorgestellt.

Modellierung der Fahrtroute



Abb. 3: Segmentierung der Fahrtroute mittels Segmentierung in Wegpunkten

Um die Energiebedarfsrechnungen vorab durchführen zu können, ist grundsätzlich eine Modellierung im Zeitbereich nötig. Dazu wird auf das bereits vorhandene Manövriermodell zurückgegriffen, welches im Prinzip auch die Driftfahrt berechnen kann. Dazu musste lediglich die Berechnung des stationären Gleichgewichtes durch

eine Berechnung im Zeitbereich ersetzt werden. Für diese Zeitbereichsrechnungen können dann Schwimmlage und Umgebungsbedingungen durch Zufallswerte vorgegeben werden, die mittels einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt werden. Zur Durchführung dieser Zeitbereichsrechnungen werden die Standardmanöver, die aktuell schon gerechnet werden, erweitert. Da die zu untersuchenden Schiffe bestimmten Routen folgen, wird ein automatisiertes Manöver implementiert, bei dem das Schiff in der Manöverberechnung vorgegebenen Wegpunkten folgt. Dazu wird das sogenannte Schiffsführungssystem „Line of Sight Concept“ verwendet. In diesem Verfahren werden zunächst Verbindungslinien zwischen den gesetzten Wegpunkten erzeugt. Der Soll- Steuerkurs des Schiffes wird dann so gesetzt, dass das Schiff diesen Verbindungslinien folgt, bis es den nächsten Wegpunkt erreicht hat. Ab dort orientiert sich das Schiff an den nächsten Verbindungslinien, bis dann das Ende der vorgegebenen Route erreicht wird. Im Allgemeinen funktioniert es so, dass um jeden Wegpunkt ein sogenannter Radius of Acceptance (eine Art Fangradius) bestimmt wird. Wird dieser von der aktuellen Position des Schiffes überschritten, wird der nächste Wegpunkt angesteuert. Bei engen Kurven und /oder hohen Geschwindigkeiten muss der Manövriervorgang des Schiffes früher eingeleitet werden, um ein Überschwingen (Schiff fährt über den Wegpunkt hinaus) zu verhindern. Deshalb ist der Radius of Acceptance nun nicht mehr konstant, sondern abhängig vom Winkel zwischen den vom Wegpunkt wegführenden zwei Trajektorien und des Drehkreises der vorliegenden Geschwindigkeit. Um nun den Soll-Steuerkurs einzuhalten und an Wegpunkten die neuen Verbindungslinien anzusteuern, wurde der bestehende Ruder-Autopilot erweitert und angepasst. Darüber hinaus muss das Schiff einer Geschwindigkeitsvorgabe folgen, die aktuell wegpunktabhängig gesetzt werden kann. Hierzu wurde der bestehende PI-Regler so angepasst, dass nun abhängig der Geschwindigkeit (vorher war es die Drehzahl) die Einspritzmenge einregelt wird. Dabei ist es aber auch möglich, dass die Sollvorgabe der Geschwindigkeit nach bestimmten Optimierungsüberlegungen bestimmt wird.

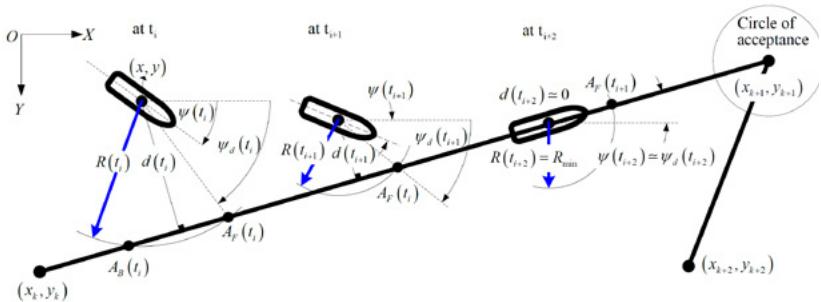


Fig. 7-2 LOS Guidance scheme based on a variable radius.

Abb. 4: Schiffsführungssystem nach Line-of-Sight-Konzept

Berechnung des Langzeitenergiebedarfes

Einen erheblichen Einfluss auf den Langzeitenergiebedarf eines Schiffes haben die vorherrschenden Umweltbedingungen (Wind, Welle, Strömung, Flachwasser). In Abhängigkeit des Einsatzgebietes sind die Umweltbedingungen unterschiedlichen statistischen Schwankungen unterworfen. Um die im Forschungsprojekt angestrebte Abbildung im zeitlichen Verlauf darzustellen, reicht eine solche statistische Betrachtung nicht aus. Ziel muss es also sein, für ein Schiff auf einer beliebigen Route möglichst genau die Umweltparameter an der aktuellen Schiffsposition zu bestimmen und für einen realistischen kontinuierlichen Verlauf der Umweltkräfte zu sorgen. Dabei bietet es sich an, bestehende Klima-Datenbanken zu nutzen, welche sowohl zeitlich wie auch räumlich aufgelöst sind. Aus dem EU-Vorhaben Copernicus stehen mit dem ERA5 Datensatz sogenannte re-analysierte Daten für einen Zeitraum von 1940 bis drei Monate vor der aktuellen Zeit zur Verfügung. Die re-analysierten Daten basieren auf Klimamodellen und werden mithilfe von Messdaten überprüft und präzisiert. Durch die stündliche Auflösung besteht die Möglichkeit, den realistischen zeitlichen Verlauf der Umweltkräfte berücksichtigen zu können. Für den zeitlichen Verlauf zwischen den Stundenintervallen wird eine einfache lineare Interpolation angesetzt. Räumlich stehen die Daten in einer Auflösung von

0,5° geographischer Koordinaten zur Verfügung. Um auch hier einen kontinuierlichen Verlauf der auf das Schiff aufgebrachten Kräfte zu gewährleisten, werden die Daten räumlich interpoliert. Wobei hierbei darauf zu achten ist, dass gerade bei küstennahen Routen mehrere Datenpunkte auf Land liegen können, an denen bspw. keine Wellendaten vorliegen. Deshalb wurde ein robustes Interpolationsverfahren entwickelt, das mit unterschiedlicher Verfügbarkeit an Datenpunkten umgehen kann. Die Interpolation der Datensätze erfolgt abhängig der Schiffsposition und dem zeitlichen Fahrverlauf in drei Schritten: Zunächst erfolgt die Identifizierung der Nachbarpunkte der Schiffsposition, anschließend die räumliche Interpolation zwischen den gültigen Nachbarpunkten, und dann die zeitliche Interpolation. Es wird somit zunächst der Quadrant identifiziert, in dem sich das Schiff befindet und geprüft, welche Datenpunkte auch Werte beinhalten. Abhängig davon wird das räumliche Interpolationsverfahren gewählt und durchgeführt. Im Anschluss kann dann die zeitliche Interpolation vorgenommen werden. Nun kann für bestimmte Routen ein passender räumlicher und zeitlicher Bereich aus den ERA5-Daten in die Manövriermethode geladen werden. Der Interpolationsalgorithmus bestimmt in Richtung und Stärke die auf das Schiff wirkenden Umweltparameter aus den umliegenden Datenpunkten. Abbildung 5 (oben) zeigt eine Route zwischen Cuxhaven und Immingham (typische Frachtschiffroute). Abbildung 5, unten links, zeigt die über den Routenverlauf veränderlichen Umweltparameter. Die Manövriersimulation bestimmt daraus den Leistungsverlauf. Abbildung 5, unten rechts, zeigt eine solche berechnete Leistungszeitreihe für drei verschiedene Tage.

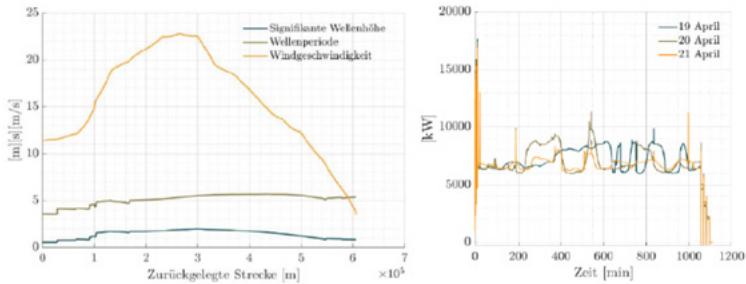
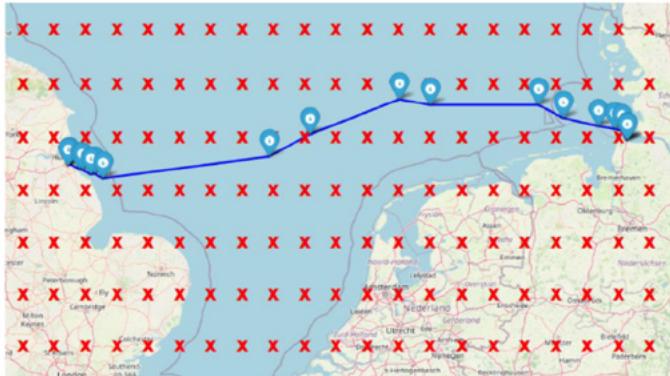


Abb. 5: Schiffsroute mit Wegpunkten, Datenpunkte des ERA5-Datensatzes sowie Umweltparameter und Leistungsbedarf auf der Route für verschiedene Tage.

Da die vorgegebene Schiffsroute ohnehin in Segmente eingeteilt ist, bietet es sich insbesondere bei verschiedenen Wassertiefen an, den Geschwindigkeits-Sollwert auf jedem Segment so zu optimieren, dass der Leistungsbedarf minimal wird. Das ist als Vorstufe für ein Betriebshandbuch notwendig. Dabei muss als Randbedingung beachtet werden, dass der Fahrplan eingehalten werden muss. Zur Bearbeitung dieses Problems wird der bereits implementierte Chvarismi-Optimierer für das vorliegende Optimierungsproblem angepasst. Ziel ist es, die optimale Schiffsgeschwindigkeit für nicht-äquidistanten Abschnitten einer beliebigen Route mit wechselnden Wassertiefen und Umweltbedingungen zu finden.

Dabei soll zunächst ein möglichst niedriger Gesamtenergieverbrauch realisiert werden. Der Chwarismi-Optimierer basiert dabei auf der Tangent Search Method, welcher die Geschwindigkeit der Abschnitte systematisch variiert. Der Leistungsbedarf, abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit und der Wassertiefe, wird mit der statio-nären Manövriermethoden berechnet. Nach jeder Variation der Geschwindigkeit und Berechnung wird der Kraftstoffverbrauch und die Abweichung zur vorgegebenen Reisezeit bestimmt. Abhängig davon werden von der Tangent Search Method neue Geschwindigkeiten vorgegeben, bis keine Verbesserung im Kraftstoffverbrauch mehr festzustellen ist. Abbildung 6 zeigt beispielhaft, wie die Ergebnisse einer solchen Berechnung aussehen können. Wobei hier ein Fall mit acht Abschnitten und Wassertiefen zwischen 12.5 Meter und Tiefwasser dargestellt ist (oben). Abbildung 6, unten, zeigt die bestimmten Geschwindigkeiten der Abschnitte, welche zum geringen Gesamtverbrauch führen, wobei für jeden Abschnitt die optimale Geschwindigkeit, Leistung und der Verbrauch dargestellt sind.

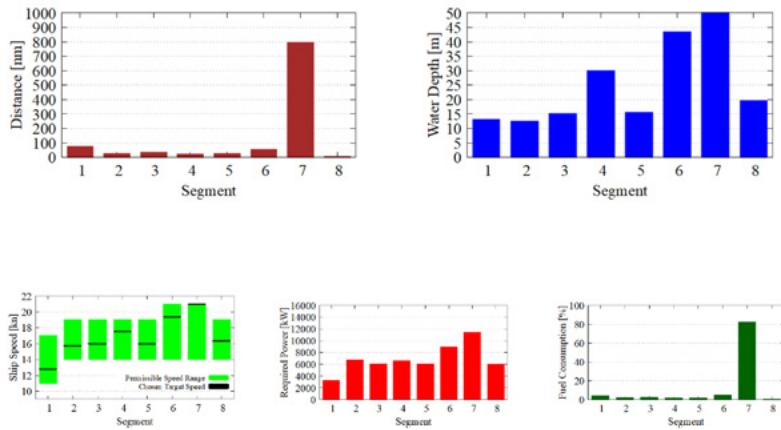


Abb. 6: Optimierung der Geschwindigkeit auf verschiedenen Segmenten einer Route

Modellierung des Bordnetzes

Bisher wurde die benötigte Leistung elektrischer Verbraucher an Bord konstant angenommen. Dies ist eine recht ungenaue Abschätzung und kann Einfluss auf die Auslegung des Energiebedarfs haben. Deshalb wird ein Monte Carlo Ansatz gewählt, um das dynamische Verhalten des Bordnetzes besser abzubilden. Dazu wird auf Basis der Gleichzeitigkeitsfaktoren einer E-Bilanz eine kumulative Verteilungsfunktion erstellt. Die kumulative Verteilungsfunktion soll auf ähnliche Schiffe übertragbar sein und kann über die benötigte Bordnetzleistung skaliert werden. Es wird dann angenommen, dass, wenn es sich um ein ähnliches Schiff handelt, ähnliche Verbraucher an Bord sind und somit die Verteilung prinzipiell gleichbleibt. Dadurch muss bei einem neuen Entwurf nicht direkt am Anfang die E-Bilanz zur Verfügung stehen, kann aber im fortgeschrittenen Projektverlauf hinzugefügt werden. Die kumulative Verteilungsfunktion kann nun genutzt werden, um zur Laufzeit der Manöverberechnung mittels der Monte Carlo Methode eine zufällige Leistung der elektrischen Verbraucher im Schiff zu bestimmen. Eine sinnvolle Wahl der Zeitschrittweite ist etwa 1s, um zu hohe Lastsprünge zu vermeiden. Aufgrund der momentan abgegriffenen Bordnetzleistung werden die Generatoren belastet, im Falle von Wellengeneratoren geht die Bordnetzleistung dann unmittelbar in das Propulsion-Control-System ein.

Gleichzeitigkeitsfaktoren aus E-Bilanz:

Pos. Verbraucher	Installierte Leistung kW		Seebetrieb		Reiverbetrieb	
	Last %	Zeit %	kW	Last %	Zeit %	kW
Abräumasse	3,0	80	0,5	0	0	0
Abräumasse/Hebelelementpumpe achter	3,0	0	0,5	0	0	0
Anker- und Vorholerwinde Bb. (12/35/35 kNm)	35,0	0	0	90	20	8,3
Anker- und Vorholerwinde Stb. (12/35/35 kNm)	35,0	0	0	90	20	8,3
* Ansaugluftkompressor 1	15,5	80	20	2,5	80	20
* Ansaugluftkompressor 2	15,5	0	0	0	0	0

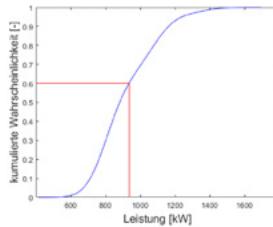
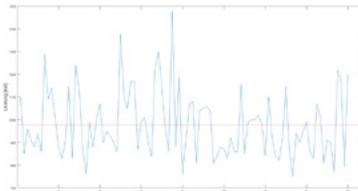
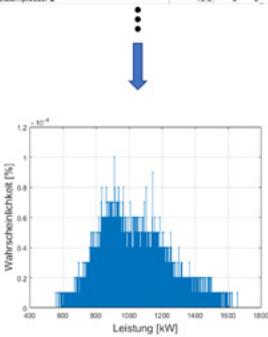


Abb. 7: Modellierung des dynamischen Bordnetzverhaltens

Modellierung von Hafenmanövern

Das Ziel war, die in Hafenmanövern stark auftretenden Lastschwankung abschätzen zu können. Dabei wird ein solches Manöver aus einzelnen Manöverbausteinen zusammengesetzt. Damit lässt sich die Berechnung auf beliebige Häfen anpassen, auch wenn jeder seine individuellen Einlaufbedingungen aufweist. Die einzelnen Manöverbausteine lassen sich aus typischen Hafenmanövern, wie Drehen und Traversieren, aber auch aus langsamer Vorwärts- oder Rückwärtsfahrt zusammensetzen. Auch die Zeit am Liegeplatz wird berücksichtigt, um bspw. emissionsfreien Betrieb untersuchen zu können. Mit diesen Überlegungen wurde aufbauend auf der bestehenden Methode des dynamischen Positionierens (DP), das Hafenmanöver aufgesetzt. Von der Idee, das Hafenmanöver im Zeitbereich umzusetzen, ist man im Rahmen des Vorhabens abgekommen, da sich das Implementieren der Regelung der Propulsionsorgane im frühen Entwurf zu aufwendig gestalten würde. Daher wird ein quasistatischer Ansatz verfolgt, bei welchem, wie in der DP-Methode, für jeden Zeitschritt ein Gleichgewicht der auf das Schiff angreifenden Kräfte (Rumpf, Propeller, Ruder, Querstrahler, Wind, Strömung)

gesucht wird und daraus der zugehörige Leistungsbedarf ermittelt werden kann. Im Anschluss werden die einzelnen Zeitschritte zu einer Zeitreihe der Leistung zusammengesetzt.

Integration des Batteriepaketes und Validierung

Schlussendlich wurde die Batterieunterstützung auch in die Kurshaltemethode zur Energiebedarfsrechnung eingebunden. Somit ist nun auch eine gekoppelte Rechnung zwischen Manövrierberechnung und Motorsteuerung möglich. Durch das direkte Einbinden des Batteriesystems in der frühen Phase kann jetzt der Einfluss der Batterie auf das Motorverhalten und die Automation untersucht werden. Für die Erweiterung wird den Motoren nun Leistung über den Wellengenerator von der Batterie zu- oder abgeführt, so dass sie nicht in ineffizienten Bereichen betrieben werden. Die Art der Batterieunterstützung wird über das Power-Managementsystem geregelt. In Abbildung 8 ist beispielhaft die Batterieleistung, die Motorenleistung und die benötigte Leistung in einer stufenweisen Beschleunigung dargestellt. Es ist zu sehen, dass ab einem bestimmten Leistungsniveau die Batterie den Leistungsbedarf anteilig ergänzt, während der Motor auf konstantem und effizientem Niveau weiter betrieben wird. Entsprechend der benötigten Batterieleistung wird die Batterie entladen, was sich im Ladezustand (State of Charge) widerspiegelt. Dieser ist auf der rechten Achse in Abbildung 8 abgetragen.

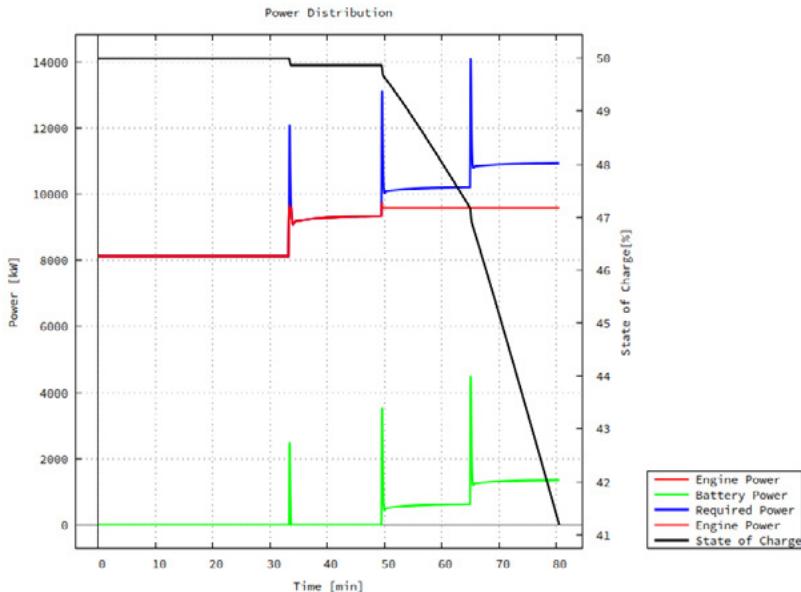


Abb. 8: Wechselwirkung zwischen Batteriesystem und der Motorsteuerung bei einem Beschleunigungsmanöver.

Validierungen der entwickelten Methoden wurden anhand von Probefahrtmessdaten der FSG durchgeführt. Es wurde ein Ausschnitt der Probefahrt gewählt, in welchem hoch aufgelöste Leistungsdaten zu Verfügung stehen. Die Route des Schiffes startet dabei in der Flensburger Förde und endet im Kattegat. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass die Validierung nicht durch direkte Vorgaben von Ruderstellung und Drehzahl / Propellersteigung durchgeführt wird, denn die Methode soll ja das Schiffsverhalten selbst richtig prognostizieren können. Deshalb wurden zum einen Wegpunkte anhand der tatsächlich abgefahrenen Schiffsroute gesetzt, woraus die Kursvorgabe resultiert. Dazu kann wiederum der Ruder-Autopilot die Ruderstellung bestimmen. Zum anderen wurde, orientiert am gemessenen Geschwindigkeitsverlauf, abschnittsweise ein Sollwert vorgegeben, welcher die Geschwindigkeitssteuerung einsteuern soll. Der abgefahrene Schiffsverlauf wird dabei sehr gut getroffen. In der Detailansicht von Abbildung 9 zeigt sich, dass bei der Rudersteuerung noch kleine Nachbesserungen nötig sind. Die

Kurven werden teilweise etwas enger gefahren, als aus den Messdaten hervorgeht. Das kann natürlich auch einen Einfluss auf das Leistungsverhalten in der Kurvenfahrt haben.

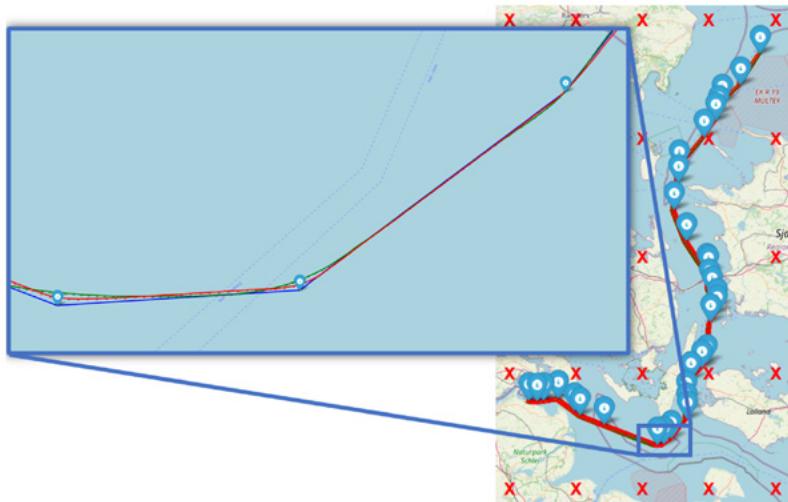


Abb. 9: Routenverlauf von Teilen der Validierungsroute. Grün: Gemessen, rot: berechnet

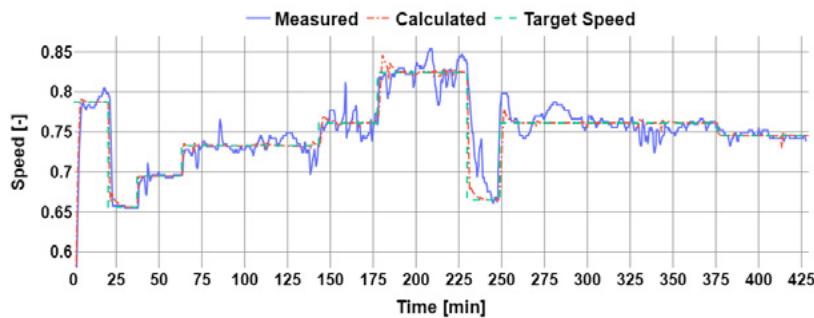


Abb. 10: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Geschwindigkeit

Abbildung 10 zeigt wiederum den gemessenen und berechneten Geschwindigkeitsverlauf. Zusätzlich wurde die vorgegebene Sollgeschwindigkeit dargestellt. Zwischen der Geschwindigkeitsvor-

gabe und der Messung sind bereits zwischenzeitliche Unterschiede, welche in der Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Leistung berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich ist der befahrene Abschnitt sehr von flachem Wasser geprägt, welches in seiner Tiefe und bei diesen Schiffsgeschwindigkeiten und -abmessungen den Leistungsbedarf entscheidend beeinflusst. Hierfür wird auf die GEBCO Datenbank zurückgegriffen, in welcher gitterweise und abhängig des Breiten- und Längengrads Wassertiefen hinterlegt sind. Diese werden für die Berechnung genutzt und zusätzlich nach dem oben beschriebenen Interpolationsansatz auf die Schiffsposition übertragen. In Abbildung 11 sind die berechneten und gemessenen Werte für den Leistungsbedarf gegenübergestellt. Es zeigt sich eine größtenteils gute Übereinstimmung. Gerade durch die Berücksichtigung der Wassertiefe wird eine realistische Prognose erstellt. Beispielsweise wird zwischen Minute 75 bis 150 der Verlauf stark aufgrund veränderlicher Wassertiefe beeinflusst und folgt dabei den gemessenen Leistungswerten. Abweichungen treten hauptsächlich auf, wenn auch die Wassertiefe oder die vorgegebene Geschwindigkeit nicht exakt mit den Messdaten übereinstimmen. Zwischen Minute 150 und 200 lassen sich beispielhaft gut die Unterschiede zwischen den Wassertiefeninformationen erkennen. Hier gibt der Datensatz stellenweise eine geringere Wassertiefe aus, was zu höheren berechneten Leistungswerten führt. Besonders wenn die Wassertiefe sowieso schon niedrig ist, hat das einen starken Einfluss. Die Diskrepanz in den Leistungswerten zwischen Minute 250 und 300 ist in erster Linie auf Unterschiede in der Schiffsgeschwindigkeit zurückzuführen. Ausgelöst wird das durch eine gegenüber den Messwerten teilweise abweichende Sollgeschwindigkeit. Insgesamt fällt der Vergleich zwischen Messung und Rechnung zufriedenstellend aus.

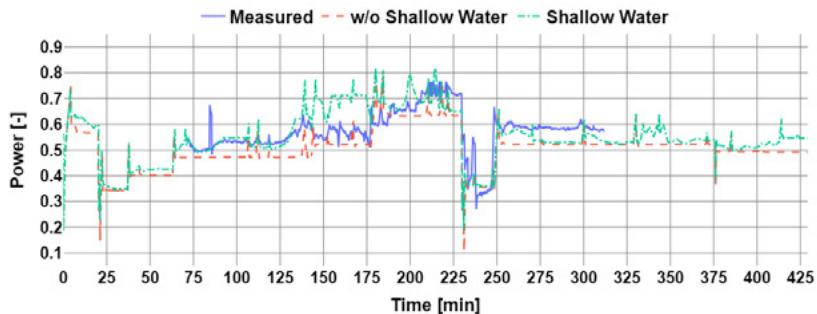


Abb. 11: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Leistung

Zusammenfassung

Im Vorhaben BATMAN+ ist es gelungen, spezielle Berechnungsmethoden und -ansätze für die zuverlässige Auslegung von Batteriesystemen auf Schiffen zu entwickeln. Kern ist dabei eine Energiebedarfsrechnung, welche auf der Kombination von Zeitreihenberechnungen des Leistungsbedarfes unter Manövrierbedingungen mit einer Langzeit Monte-Carlo-Simulation funktioniert. Das Bordenetz wurde ebenfalls im Zeitbereich beschrieben, wobei die einzelnen Verbraucher mittels Gleichzeitsigkeitsfaktoren beschrieben werden, die ebenfalls zufallsbasiert sind. Zur Erfassung von Leistungsspitzen werden standardisierte Hafenmanöver hinzugezogen. Die Umweltbedingungen auf der gewählten Route können durch direkten Zugriff der ERA5-Datenbank ermittelt werden. Die direkte Integration des Batteriesystems in die Motorsteuerung ermöglicht die direkte Systemsimulation im Zeitbereich. Die Ergebnisse der Validierungsrechnungen waren zufriedenstellend. Damit steht jetzt eine Methodensammlung zur Verfügung, die eine zuverlässige Auslegung von Batteriesystemen ermöglicht.

Danksagung

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (ehemals Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) für die Förderung des Verbundvorhabens BATMAN+ sowie dem Projektträger Jülich für die kompetente und stets konstruktive Betreuung des Vorhabens.

03SX573

Bross

Ermittlung des Einflusses korrosiver Beanspruchungen und lokaler Fehlstellen auf die Beanspruchbarkeit von Bronze-Gusswerkstoffen

Autorenliste

Fraunhofer-Institut LBF

Dr. Christoph Bleicher
Dr. Steffen Schönborn

Mecklenburger Metallguß GmbH

Marcel Nürnberg
Jörn Klüss
Lutz Kleinsorge



1. Einleitung

Im Sowohl im Bereich der regenerativen Energieerzeugung mittels Wasser- und Gezeitenkraftwerken, als auch in der maritimen Schifffstechnik werden Aluminiumbronzelegierungen (CuAl-Bronze) für Turbinen bzw. Schiffspropeller eingesetzt. Die Herstellung dieser zum Teil sehr großen Bauteile mit Einzelmassen weit über 10 t stellt die Gießer vor besondere Herausforderungen, da in der Schmelze befindliche Wasseranreicherungen zur Bildung von gasförmigem Wasserstoff im Werkstoff und damit zu Poren (Fehlstellen) in den Gusswerkstücken führen können [DKI58]. Hierauf hat der eingesetzte Formstoff einen erheblichen Einfluss. Die Verwendung von beispielsweise anorganischen Bindemitteln wie Wasserglas in Formstoffen aus Zement führt dabei aufgrund von Hydrolyse zu geringeren Wassergehalten. Durch die Steigerung des Anteils an Trockensubstanz wird einerseits der Wassergehalt im Formstoff verringert, andererseits bewirkt dies aber eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit der Gussform und so eine tendenziell größere Korngröße und somit niedrigere Schwingfestigkeit [PIT25]. Steigende Binderanteile können dagegen eingesetzt werden, um den Wärmetransport der Gussform zu erhöhen. Die veränderten Wärmetransporteigenschaften der Gussform können lokal zur Ausbildung unterschiedlicher Mikrostrukturen führen, welche die Werkstoffeigenschaften der gegossenen Bauteile maßgeblich beeinflussen [PIT25]. Zudem wird bei Aluminiumbronzen mit einem Aluminiumgehalt von über 9 % eine genügend schnelle Abkühlgeschwindigkeit benötigt, um ein optimales Korrosionsverhalten zu erreichen [DKI10]. Dies kann insbesondere bei den Großgussbauteilen zu Herausforderungen führen, da hier im Abkühlungsprozess große Wärmemengen abgeführt werden müssen. Jedoch ist die schnelle Abkühlung in der Regel mit guten lokalen Gefügeeigenschaften verbunden und führt damit auch zu einer deutlich erhöhten Schwingfestigkeit und damit Bauteilbeanspruchbarkeit bzw. Lebensdauer.

Mit einer schnellen Abkühlung sollen ungünstige Zustände im Gefüge vermieden werden, die sich sonst ausbilden. Diese haben eine höhere Härte und fördern selektive Korrosionsmechanismen.

Dies hat einen negativen Einfluss auf die mechanische, quasi-statische sowie zyklische Beanspruchbarkeit.

Hinzu kommt der Einfluss oberflächennaher Poren, die als scharfe Mikrokerben wirken und durch die resultierende Spannungsüberhöhung zu einer Beschädigung der schützenden auf Aluminiumoxiden basierenden Passivschicht führen können. Ausgehend von diesen geschädigten Bereichen kann nachfolgend die Initiierung von selektiven Korrosionsformen erfolgen. Diese erhöhte Korrosionsneigung des Werkstoffes bei Anwesenheit von Meerwasser bzw. salzhaltigem Wasser kann die Korrosionsschwingfestigkeit von Bauteilen in maritimen Anwendungen signifikant reduzieren, was sich sowohl negativ auf die Sicherheit als auch auf die Zuverlässigkeit der Bauteile im Betrieb auswirkt [BER16, WEN86]. Bei einer wirtschaftlichen Betrachtung stellen die Abkühlbedingungen einen enormen Faktor zur Steigerung der Produktivität, insbesondere bei der Herstellung der Großgussbauteile, dar. So besteht seitens der Gießereien die Herausforderung, die Abkühlzeiten so zu steuern, dass ausreichend hohe Taktzeiten im Herstellungsprozess erreicht werden können, ohne dabei die Mikrostruktur des Werkstoffgefüges negativ zu beeinflussen.

Zudem bestehen in der Praxis im Rahmen der Lebensdauerbemessung dieser Bauteile bei Gussanwendern derzeit Unsicherheiten hinsichtlich der Wechselwirkungen von im Rahmen der Abkühlbedingungen eingestellten Werkstoffgefügen möglicher, durch den Gießprozess eingebrachter Poren und der korrosiven Umgebung auf das Schwingfestigkeitsverhalten. Es ist ungeklärt, wie diese unterschiedlichen Einflüsse im Rahmen der Bauteilbemessung berücksichtigt werden können, um einen zuverlässigen und ausfallfreien Betrieb der maritimen Bauteile zu gewährleisten.

Aus den genannten Herausforderungen wurde so ein konkreter Forschungsbedarf abgeleitet, welcher die Untersuchung von verschiedenen Verfahren bei der Herstellung von Bauteilen mit unterschiedlichen Abmessungen aus Aluminiumbronzeugusslegierungen zum Inhalt hat. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Bross“ wird somit

der Einfluss von gefügebedingten Werkstoffeigenschaften wie Poren sowie korrosiver, salzhaltiger Medien auf das Schwingfestigkeitsverhalten von mit unterschiedlichen Abkühlbedingungen hergestellten Aluminiumbronzelegierungen eingehend untersucht und der Beanspruchung im Betrieb gegenübergestellt.

2. Durchführung

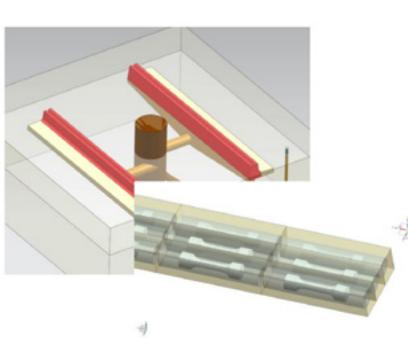
Um die Einflüsse aus dem Herstellungsprozess bewerten zu können, wurde zunächst durch die Partner eine abgestimmte Versuchsmatrix entwickelt. Diese ist grob in der Tabelle 1 dargestellt. In einer ersten Versuchsserie wird zunächst der Einfluss von Legierungsvariationen der Kupferbasislegierung auf das Schwingfestigkeitsverhalten untersucht. In einer zweiten Versuchsserie wird weiterhin der Einfluss von Formstoffmodifikationen und der Wanddicke auf das Schwingfestigkeitsverhalten betrachtet. Dies geschieht mit einer aus der ersten Versuchsserie ausgewählten, optimalen Legierung.

Schwingfestigkeitsversuche unter Korrosion sind aufgrund der niedrigen Lastwechselfrequenzen sehr zeit- und kostenintensiv. Daher wird ein Großteil der Versuche zunächst unter Luft ausgeführt und abschließend unter Korrosion das Schwingfestigkeitsverhalten abgesichert.

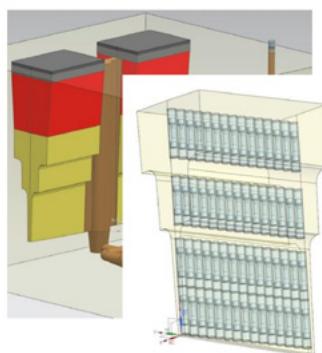
Tab. 1: Versuchsmatrix im Vorhaben „Bross“ zur Ermittlung des Schwingfestigkeitsverhaltens von Aluminiumbronzelegierungen

Versuchsplan			Modifikation Legierung TA 1.1		Modifikation Formstoff TA 1.2								
			7 verschiedene Chargen		1 Charge								
			Abgussform groß		Abgussform groß (abgestuft)								
			trocken		trocken		feucht		medium feucht				
			Wanddicke [mm]		Wanddicke [mm]								
Lastverhältnis R	Medium	Frequenz [Hz]	40	40	200	400	40	400	40	40	400		
-1	Luft	~100	55	10	10	10	10	10	10	10	10		
0	Luft	~100	15	10	10	10	10	10	10	10	10		
-1	3%-NaCl	~15	40	10		10	10	10	10	10	10		
0	3%-NaCl	~15	30	10									
Schwingfestigkeitsversuche insgesamt:												350	

Für die Modifikation der Legierung und des Formstoffes wurden geeignete Gussmodelle entwickelt, die es ermöglichen, die Anzahl an Probenkörpern aus einem Abguss herzustellen und gleichzeitig realistisch die Bedingungen beim Abguss eines Propellers wiederzugeben. Abbildung 1 zeigt die realisierten Gusskörper sowie die Anordnung der daraus entnommenen Probekörper. Für die Legierungsmodifikation wurden 7 verschiedene Chargen abgegossen. Hierbei wurde sich an den international durch die [IACS23] vorgegebenen Legierungen orientiert, wobei der Abguss zu jeweils gleichen Bedingungen durchgeführt wurde. Für die Formstoffmodifikation wurde der Gusskörper um Abstufungen mit verschiedenen Wanddicken erweitert. Die Wanddickenvariation führt zu einem unterschiedlichen Abkühlverhalten und entspricht typischen Flügeldicken, wie sie auch bei der Propellerherstellung vom Bereich der Nabe bis hin zur Spitze im Flügel auftreten. Die Feuchte des Zementformstoffs stellt einen zusätzlichen Einflussfaktor in der Bewertung dar. Daher sind drei verschiedene Gusskörper mit unterschiedlichen Trocknungsgraden des Zementformstoffs für die spätere Probenentnahme angefertigt worden.



Gusskörper Legierungsmodifikation



Gusskörper Formstoffmodifikation

Abb. 1: Entwickelte Gussformen und -körper zur Probenherstellung

Die Abbildung 2 zeigt den Prozess zur Herstellung der Probekörper für die Formstoffmodifikation: Nach dem Bau der Gussform erfolgte

die Trocknung zu einem unterschiedlichen Grad der Endfeuchte der Form sowie anschließend der Abguss aller Formen mit einer Charge der CU3-Legierung. Aus den entstandenen Gussrohlingen wurden die Halbzeuge zur Probenfertigung geschnitten. Die Zuordnung der Halbzeuge für die weiteren Versuche wurde mit Hilfe einer eindeutigen Identifikationsnummer auf jeder Werkstoffprobe gewährleistet, um eine geschlossene Rückverfolgbarkeit des Festigkeitsverhaltens jeder Probe in der Gussform mit den lokalen Gießparametern zu ermöglichen.

Im Gusswerkstück können – gerade bei feuchtem Formstoff – Poren und Lunker entstehen. Diese haben große Auswirkungen auf den Schwingfestigkeitsversuch [BLE16]. Es soll möglichst ausgeschlossen werden, dass solche Proben das Versuchsergebnis beeinträchtigen. Daher wurden die Halbzeuge vor der Fertigung des Probekörpers per Röntgenprüfung auf Einschlüsse oder Fehlstellen analysiert. Die Entnahme der Proben wurde zudem permanent mit dem DNV als Zertifizierungsorgan für den maritimen Bereich abgestimmt, um eine mögliche Zertifizierung der Forschungsergebnisse für eine schnelle Überführung in die Praxis zu ermöglichen.



1. Formbau



2. Trocknung



3. Abguss



4. Gussrohling

Abb. 2: Herstellung der Probekörper für die Formstoffmodifikation

Bei der Durchführung der zyklischen Werkstoffuntersuchungen unter Korrosion orientierten sich die Projektpartner daher auch an der DNV-Richtlinie DNV-CG-0039 [DNV21]. Während in nicht korrosiven Medien die Versuchsfrequenz maßgeblich durch die Probenkörper-eigenschaften reglementiert werden und bei bis zu 100 Hz liegen, ist die Versuchsfrequenz in korrosiven Medien nach Vorgabe durch den DNV auf maximal $f = 15$ Hz zu begrenzen. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass Korrosionsvorgänge zeitgetrieben ablaufen und durch eine zu hoch gewählte Versuchsfrequenz die Korrosion nicht ihre Wirkung entfalten kann. In diesem Fall wäre das Ergebnis der Untersuchung wahrscheinlich nicht für die Auslegung sicherer Propeller verwendbar. Um in den typischen Lastwechselzahlbereich von Propellern bei $L > 1 \cdot 10^8$ Lastwechselspielen zu kommen, werden dafür sehr zeitaufwendige Versuche nötig, wobei ein Schwingfestigkeitsversuch bis zu 3 Monate dauern kann. Eine verlässliche statistische Absicherung dieser Versuche ist damit nicht möglich. Für die Versuchsreihen ist daher das Versuchsprogramm vereinzelt angepasst worden, um einerseits Einflüsse der Versuchsmethodik (Prüffrequenz, Vorkorrosion) auf die Ergebnisse zu untersuchen und andererseits genügend Versuche für eine statistische Absicherung zur Verfügung zu haben. Wenn möglich werden die Versuche unter Luft durchgeführt, um anschließend die Ergebnisse anhand der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse für die Anwendung in korrosiver Umgebung zu korrigieren.

Um die Versuche durchführen zu können, wurde eine spezielle Probenform wie auch eine Medienkammer entwickelt. Für die Versuche unter Korrosion wurden abgedichtete Röhren um die Schwingprobe konstruiert, welche kontinuierlich mit Salzwasser durchströmt werden. Die Probenfertigung aus Halbzeugen und der Versuchsaufbau sind in Abbildung 3 dargestellt.

Für alle Modifikationen des Gussprozesses bzw. der Legierung werden parallel zur Ermittlung der zyklischen Werkstofffestigkeit auch zusätzlich Zugversuche und damit die statische Beanspruchbarkeit ermittelt. Hier ist insbesondere interessant, inwieweit sich aus den Werten für die Streckgrenze und Dehnung bereits Rückschlüsse

auf das Betriebsfestigkeitsverhalten ziehen lassen. Die Proben werden zudem nach den Versuchen auf ihr Gefüge untersucht, sodass alle gefüge- und fertigungsbedingten Einflüsse ebenfalls in die Gesamtbetrachtung und das Bauteilbemessungskonzept am Projektende mit einfließen können. Details der Durchführung der Versuche und deren Auswertungen wurden bereits in [BLE24] publiziert.



Abb. 3: Herstellung der Proben für die Schwingfestigkeitsversuche

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse im Vorhaben erlauben einen vertieften Einblick in das Schwingfestigkeitsverhalten von verschiedenen Werkstoff- und Formstoffmodifikationen. Mit Hilfe der Daten ist es möglich, den Einfluss auf die Betriebsfestigkeit aufzuzeigen. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse unter Luft bei Wechselbelastung dargestellt, wobei die einzelnen Chargen mit unterschiedlichen Legierungsanteilen der Bronze verglichen werden. Es zeigt sich, dass die Chargen 1, 2 und 7 hier am günstigsten abschneiden und die höchste Schwingfestigkeit aufweisen. Im Vergleich hierzu ist die Beanspruchbarkeit der Charge 5, insbesondere im höherzyklischen Lebensdauerbereich, geringer.

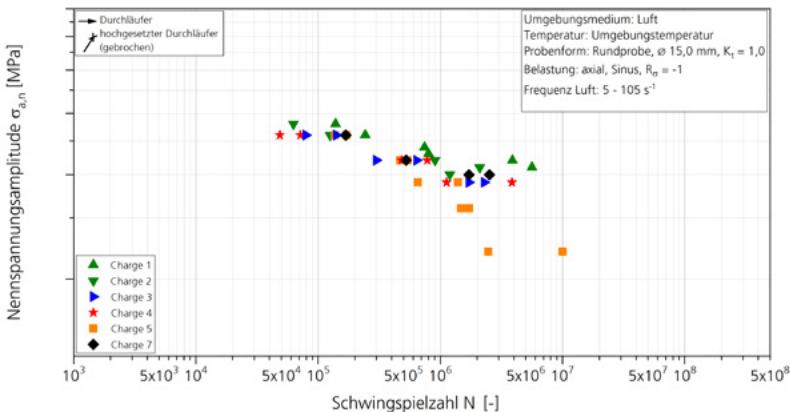


Abb. 4: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche unter Luft für verschiedene Legierungsmodifikationen

In der Projektlaufzeit wurden daher die vergleichbaren Chargen 1, 2 und 7 für weitere umfangreichere Untersuchungen auch unter Seewasser ausgewählt. Die Ergebnisse hierfür sind in der Abbildung 5 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte der drei Chargen kaum streuen. Die anhand der Einzelergebnisse gemeinsam ausgewertete Wöhlerkurve wurde nach der Maximum-Likelihood Methode ermittelt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen unter Luft, knickt die Wöhlerlinie unter Meerwasser durch den Korrosionseinfluss ab und folgt einer deutlich steileren Neigung im VHCF-Bereich. Der imaginäre Knickpunkt, welcher experimentell nicht bestimmt wurde, ergibt aus der zu geringen Expositionszeit im Medium bei Versuchen im LCF-Bereich, wodurch ertragbare Nennspannungsamplituden wie an Luft erreicht werden. Durch die umfangreichen Versuche bis hin zu hohen Schwingspielzahlen ($N > 10^8$) konnte ausgeschlossen werden, dass die Wöhlerlinie im VHCF-Bereich eine flachere Neigung annimmt und sich eine sogenannte Dauerfestigkeit abzeichnet.

Abbildung 5 zeigt zudem einen Vergleich von Untersuchungsergebnissen bei 5 und 45 Hz. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass zumindest in diesem Bereich die Versuchsfrequenz kein Einfluss auf die Lebensdauer besitzt und somit ein

Lebensdauernachweis auf Probenebene auch bei deutlich erhöhter Versuchsfrequenz durchgeführt werden kann.

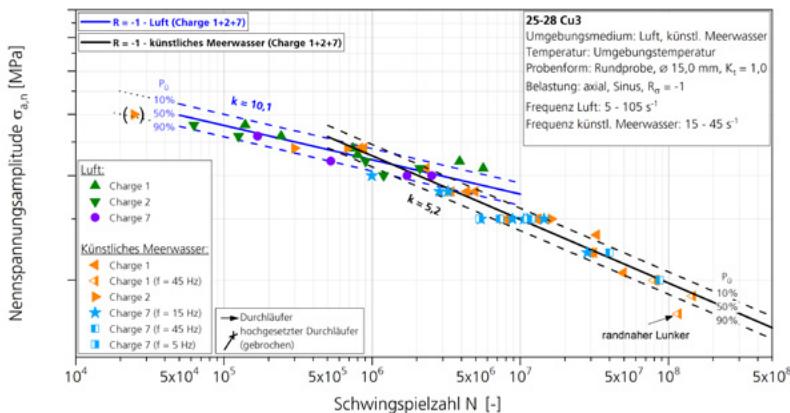


Abb. 5: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche unter Luft und unter Korrosion im Meerwasser

Die gebrochenen Proben aus den Schwingfestigkeitsversuchen wurden zusätzlich mit Hilfe von Mikroschliffen auf ihre Gefügecharakteristik untersucht. Die Abbildung 6 zeigt hierzu beispielhaft, wie unterschiedlich sich die Gefüge je nach Charge und Ort in der Form ausbilden. Als Beispiel sind hierfür Aufnahmen einer Probe mit niedriger sowie einer mit hoher Lebensdauer gegenübergestellt. In den oberen, ungeätzten Schlifffeldern sind die eisenreichen Phasen blau dargestellt. Bei dem Gefüge mit vorteilhaften Eigenschaften sind diese rund und gleichmäßig verteilt, während diese im Gefüge mit niedrigerer Dauerfestigkeit eher ungleichmäßig und größer sind. In den unteren, geätzten Schlifffeldern ist der Gefügeaufbau dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Proben mit höherer Schwingfestigkeit einen feineren Gefügeaufbau haben, während die schlechter abgeschnittenen Proben ein gröberes Gefüge haben und Gussfehler enthalten. Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche lassen sich damit den Gefügeeigenschaften gut zuordnen.

Aus der Formstoffmodifikation und dem abgestuften Abguss mit unterschiedlichen Dicken ergibt sich für Versuche unter Luft die Wöhlerlinie in Abbildung 7. Ein deutlicher Einfluss der Wanddicke auf die Schwingfestigkeit ist erkennbar. Die Formstofffeuchte scheint jedoch keinen Einfluss zu haben. Die Untersuchungen hierzu sind noch nicht abgeschlossen. Es werden weitere Versuche unter Meerwasser durchgeführt.

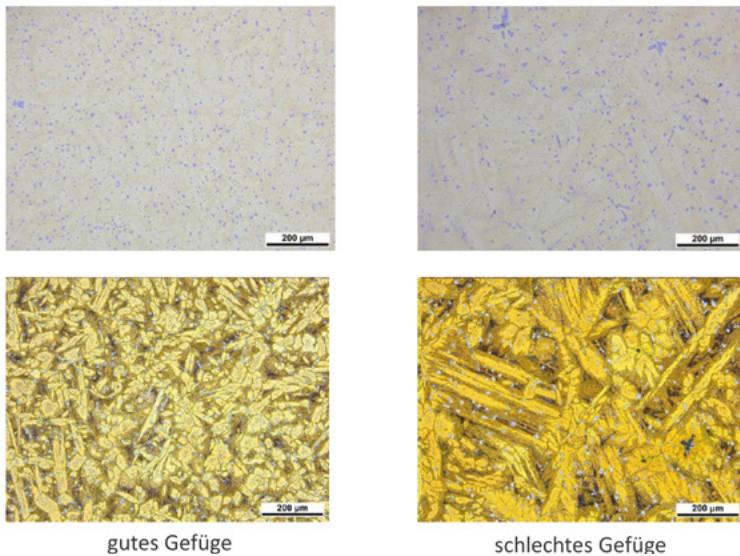


Abb. 6: Schliffanalysen von Proben zur Gefügecharakterisierung

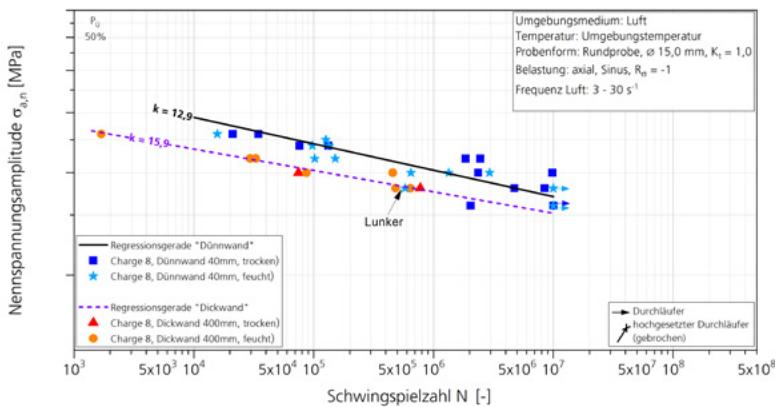


Abb. 7: Dickeneinfluss auf die zyklische Beanspruchbarkeit

4. Verwertung

Die umfangreichen Schwingfestigkeitsversuche, zusammen mit den Gefügeuntersuchungen liefern neue Erkenntnisse zum Schwingfestigkeitsverhalten von Aluminiumbronze-Legierungen. Die Ergebnisse aus „Bross“ erlauben Einflüsse bei der Herstellung auf das Schwingfestigkeitsverhalten zu bewerten. Dies ermöglicht es dem Unternehmen langfristig Prozesse und deren Auswirkungen auf die Qualität des Produktes zu bewerten. Die Herstellungsprozesse können damit im Schmelzbetrieb und der Gießerei weiter optimiert und zur Steigerung der Materialeigenschaften ohne Qualitätsverlust verbessert werden. So lassen sich durch die eindeutige Leistungsbestimmung der untersuchten Gefügezustände Grenzwerte für den Einsatz bestimmter Formstoffe und Schlichten sowie Feuchten im Formstoff definieren, um ein Optimum an Werkstoffausnutzung, Ressourcenschonung, Beanspruchbarkeit und Produktionseffizienz zu erreichen. Die Ergebnisse aus „Bross“ fließen auch in die Erstarrungs- und Wärmebehandlungssimulation für optimierte, metallurgische Prozessrouten ein.

Mit Hilfe der Ergebnisse kann die aktuelle Bauteilbemessung von Propellern weiterentwickelt werden, um leistungsfähigere und leichtere Propeller herzustellen. Durch die genaue Kenntnis der

Schwingfestigkeit lassen sich in der Bauteilbemessung Sicherheiten reduzieren, bzw. konservative Bemessungsansätze durch realistischere Betrachtungen ersetzen. Zudem liefert „Bross“ umfangreiche Daten zur Gefügeausbildung und den Eigenschaften des Werkstoffes in Abhängigkeit von Position und Herstellungsparametern. Dies soll im Weiteren in die Bauteilbemessung integriert werden, sodass Lebensdauernachweise am Bauteil unter realistischen Annahmen durchgeführt werden können. Dies wiederum führt zu leistungs- und ressourcenoptimierten Bauteilen, welche wettbewerbsfähiger sind.

Mit den Erkenntnissen aus „Bross“ stehen dann Beurteilungsmethoden und Kennwerte zur Werkstofffestigkeit für Aluminiumbronzen zur Verfügung, die bereits im Konstruktionsprozess moderner Schiffspropeller eine Voraussage lokaler Materialeigenschaften für diese Werkstoffe zulassen.

5. Zusammenfassung

Das Vorhaben „Bross“ untersucht die Beanspruchbarkeit von Aluminiumbronze-Gusswerkstoffen, wie sie in der maritimen Industrie zum Beispiel für Propeller eingesetzt werden. Durch ein umfangreiches Versuchsprogramm konnten Auswirkungen der Legierungsmodifikation und des Herstellungsprozesses auf die Schwingfestigkeit identifiziert und bewertet werden. Es konnten Verhalten und Eigenschaften für den Gusswerkstoff identifiziert werden, welche in der bisherigen Form nicht verfügbar waren. Mit Hilfe der Ergebnisse werden Herstellungsprozesse optimiert und die Bemessungsgrundlage für die Bauteile überprüft, was abschließend im noch laufenden Vorhaben durchgeführt wird. Langfristig unterstützen die Ergebnisse eine ressourcenschonende Herstellung von Schiffspropellern. Zum einen durch energetische Einsparungen in der Produktion, zum anderen durch eine optimierte Bauteilfestigkeit und damit reduzierten Materialeinsatz. Beides unterstützt die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen maritimen Industrie.

Literatur

[BER16] Bertoglio, C.; Rizzo, C: Survey on fatigue strength of cast bronzes intended for marine propellers, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 39 (7), 2016, S. 793 – 816, DOI: 10.1111/ffe.12440

[BLE16] C. Bleicher: Ein Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit mit besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen von Lunkern auf die Bauteillebensdauer, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fraunhofer LBF, Darmstadt, LBF-Bericht FB-246, 2016, ISBN 978-3-8396-1048-0.

[BLE24] Bleicher, C.; Schönborn, S.; Böhlert, S.; Kleinsorge, L.; Klüss, J.; Nürnberg, M.: Cyclic material behavior of aluminum bronze alloys under corrosion for maritime application in Proceedings of ISOPE-2024 – The Thirty Fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 16-21, 2024

[DKI85] Die Aluminiumbronzen, Deutsches Kupfer-Institut, Berlin, 1958

[DNV21] DNV: Calculation of marine propellers, Class guideline, DNV-CG-0039. Edition July 2021, DNV GL SE

[PIT25] Pittel C.; Bleicher C.; Lipp K.; Merten A.: Production of Efficient Nodular Cast Iron Gears—Considering the Fatigue Strength and Rolling Contact Fatigue Strength Based on the Local Microstructure, *International Journal of Metalcasting*, 2025, DOI: 10.1007/s40962-025-01656-x

[WEN86] Wenschot, P.: The properties of Ni-Al bronze sand cast ship propellers in relation to section thickness, *Naval Engineering Journal*, volume 98, 1986, S. 58 – 69. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1986.tb01732.x

[IACS23] IACS: W24 – Cast Copper Alloy Propellers, International Association of Classification Societies, IACS Req. 1996, Rev.5, 2023, 21 page

EROVMUS

Enhanced Remote Operated Vehicle Interface for Munition Studies

Teilprojekt: Algorithmische Umsetzung bionischer Verfahren zur Informationsverarbeitung und -speicherung sowie zur Sensordatenfusion

Autorenliste

TU Clausthal

Dr. Sabine Bohlmann
Apoorva Mahishwar
Gerrit Burmester
Sarmad Rezayat
Prof. Dr. Sven Hartmann

IngB RT&S Clausthal-Zellerfeld

Prof. Dr.-Ing. Matthias Reuter



1. Einleitung

Im Projekt **EROVMUS – Enhanced Remote Operated Vehicle Interface for Munition Studies** wurde eine verbesserte Schnittstelle für ROV-Piloten entwickelt, um Einsätze zur Detektion und Überwachung von im Meer versenkter Munition sicherer, effizienter und kostengünstiger zu gestalten [1, 2, 3].

ROVs (Remotely Operated Vehicles) werden routinemäßig für Inspektionen und Probenahmen in schwer zugänglichen oder gefährlichen Unterwasserumgebungen eingesetzt [4]. Durch die Kombination verschiedener Sensoren und moderner Datenverarbeitung können sie Aufgaben übernehmen, die für menschliche Taucher zu riskant wären [4].

Im Gesamtprojekt wurden Verfahren zur optimierten Nutzung solcher ROV-Systeme untersucht von der Entwicklung multisensorischer Plattformen bis hin zu softwaretechnischen Lösungen für Steuerung, Mensch-Maschine-Interaktion sowie die automatische Detektion, Klassifikation und Kategorisierung von Altmunition [1, 2, 5].

Der vorliegende Bericht beschreibt die am Institut für Informatik der Technischen Universität Clausthal entwickelten Methoden zur Erkennung und Kategorisierung von Munitionsobjekten mittels neuronaler Netze. Die Kategorisierung erfolgt durch die Unterscheidung zwischen potenziell gefährlichen Objekten (Targets of Interest – TOI) und harmlosen Objekten (NON-TOI). Schwerpunkte bilden die Konzeption und Implementierung automatisierter Identifizierungsroutinen, die die Effizienz und Zuverlässigkeit der Unterwasserinspektionen mit ROVs deutlich erhöhen können.

2. Motivation

Die Zielsetzung des Pariser Klimaabkommens stellt viele Länder vor Herausforderungen, ihr Energie-Portfolio um einen größeren Anteil an erneuerbaren Energien zu erweitern. Deutschland hat mit dem Ausbau der Offshore-Windenergie in der Nord- und Ostsee ein enormes Potential diesen Zielen gerecht zu werden und die Verpflichtungen einzuhalten [6, 7, 8]. Die dortigen Projekte stellen einen vielversprechenden und wichtigen Teil der Strategie dar, um CO₂-Emissionen zu reduzieren und durch den eher stabilen Anteil an Vollaststunden bei Offshore Parks können diese einen signifikanten Teil zur Deckung der Grundlast beitragen [7].

Ein enormes Problem in diesem Kontext sind die Unmengen an Kampfmitteln, die während der beiden Weltkriege in der Nord- und Ostsee versenkt wurden. Diese Materialien verursachten langfristige Umwelt- und Sicherheitsprobleme [1, 2, 3, 6]. Für eine detaillierte Bestandsaufnahme der in der deutschen Nord- und Ostsee versenkten Munition und der damit verbundenen Herausforderungen verweisen wir auf [9]. Wichtig ist, dass bei der Altmunition nach Art der enthaltenen Wirkmittel zwischen konventioneller und chemischer Munition unterschieden werden muss. Exakt verifizierte Angaben zur Menge der versenkten Altmunition gibt es nicht. Für die deutschen Teile der Nordsee gehen Fachleute von bis zu 1.300.000 t an versenkten konventionellen Kampfmittel, und von bis zu 300.000 t für die deutschen Teile der Ostsee [9]. Die Anzahl einzelner Munitionsteile dürfte im Bereich hunderttausender bis millionenfacher Stückzahlen liegen. Neben allgemeinen Gefahren für die Natur stellt selbst die Untersuchung dieser Objekte eine Gefahr für Menschen dar, sodass vermehrt ROV zum Einsatz kommen.

Nach Jahren der Korrosion sind Kampfmittel nicht nur gefährlicher, sondern auch schlechter zu erkennen und zu bergen [10]. Durch den Einsatz von verschiedenen Sensoren und erweiterter Software können ROV-Piloten bei ihren Aufgaben unterstützt werden. Insbesondere die Bilderkennung kann mit Hilfe von künstlichen Intelligenzen verbessert werden, indem ein System mit neuronalen Netzen

integriert wird, das die Erkennung von Kampfmitteln unterstützt und kategorische Ersteinschätzungen bereitstellt.

3. Einordnung in das Gesamtprojekt

Zum Konsortium des Gesamtprojekts gehören das Institute of Oceanology of the Polish Academy of Sciences (IOPAN) in Sopot (Polen), OceanTech in Chwaszczyno (Polen), das National Institute for Research and Development on Marine Geology and Geo-ecology (GeoEcoMar) in Bukarest und Constanta (Rumänien), das Institut für Informatik der TU Clausthal in Clausthal-Zellerfeld (Deutschland), Q.VITEC in Wunstorf (Deutschland), DotOcean in Brügge (Belgien), Haven Oostende und das Flanders Marine Institute in Oostende (Belgien). Die Leitung des Gesamtprojekts lag bei IOPAN.

Im Gesamtprojekt untersucht wurden verschiedene Maßnahmen zur verbesserten Navigation von ROVs, die Einführung automatisierter Identifizierungsroutinen für versenkte Altmunition sowie Technologien zur Bildverbesserung [4, 5]. Um diese Ziele zu erreichen, mussten die Informationen der eingesetzten Sensoren der ROVs software-technisch überlagert werden, um ein Heads-Up-Display (HUD) für den Piloten zu schaffen, der die Vielzahl von Monitoren, die für einen effektiven Betrieb erforderlich sind, reduzieren und in Zukunft vielleicht ganz ersetzen kann.

Darüber hinaus wurden Virtual Reality (VR)-Lösungen untersucht, die virtuelle Anzeigen und die

Kombination von Bildern mehrerer Kameras ermöglichen, um das Erkennen und Identifizieren von Altmunition signifikant zu verbessern. Im Rahmen des Projekts werden daher eine Reihe von neuen Werkzeugen entwickelt, getestet und optimiert sowie deren Interoperabilität mit verschiedenen Modellen bestehender ROVs untersucht.

Die TU Clausthal erforscht dabei Methoden zur softwaretechnischen Fusion von Informationen aus unterschiedlichen Sensoren und zu deren Integration mittels neuronaler Netze zu einem ganzheitlichen Lagebild, so dass die automatische Erkennung und Einordnung von Altmunitionsfunden im Online-Modus unterstützt wird.

Vorbereitung und Start des ROV in den Gewässern: Die ROVs werden sorgfältig aufgebaut und am Kai überprüft. Um sicherzustellen, dass vor dem Einsatz alles reibungslos funktioniert, werden alle Sensoren, Kabel und Düsen gesichert und überprüft (siehe Abb. 1). Sobald die Systeme vorbereitet sind, schickt die Crew die ROVs ins Meer. Die Verbindungskabel verbinden das ROV mit seiner Kontrollstation, sodass es mit Strom versorgt wird und in Echtzeit kommunizieren kann. Während sie sich durch die Strömungen manövriert, summen die Motoren der ROVs, wenn sie unter die Oberfläche tauchen. Die beiden Arten von ROVs unterscheiden sich in Bezug auf Größe, Geschwindigkeit, Leistung und Tiefgang (siehe Abb. 2).

Die Operation – Daten in Aktion: Der Kontrollraum (siehe Abb. 3) erwacht zum Leben, wenn die ROVs unter der Oberfläche forschen. Sonarbilder, Live-Videobilder, Navigationskarten usw. werden auf zahlreichen Bildschirmen angezeigt. Das Team beobachtet jede Bewegung und analysiert die optischen und Sonar-Messwerte in Echtzeit. Ein Team aus Ingenieuren und Forschern arbeitet zusammen, um Sensoren zu kalibrieren, die Leistung zu verfolgen und die gesammelten Daten auszuwerten, um die Mission voranzutreiben. Schließlich liefern die gesammelten Daten einen umfassenden Überblick über den Meeresboden, einschließlich der Formen, Strukturen und Eigenschaften der Objekte (TOI / NON-TOI). Mit jeder Expedition kann das Wissen über Unterwasserstrukturen und marine Lebensräume erweitert und gleichzeitig neue Technologien getestet werden.

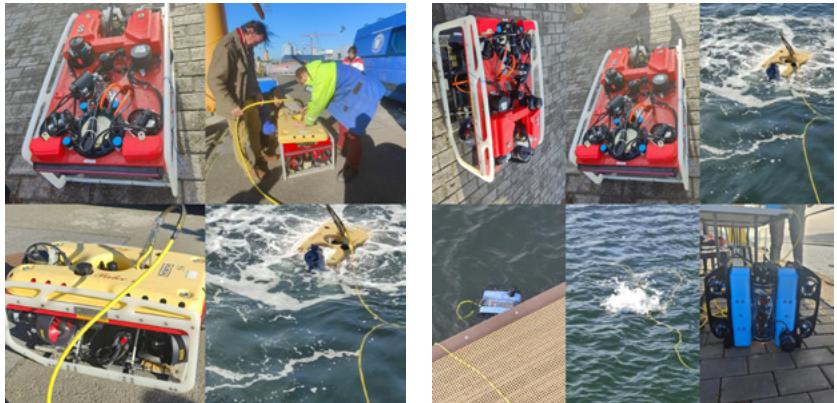


Abb. 1, links: ROV-Setup und Einsatz in der Nordsee

Abb. 2, rechts: Tests mit verschiedenen ausgestatteten ROVs

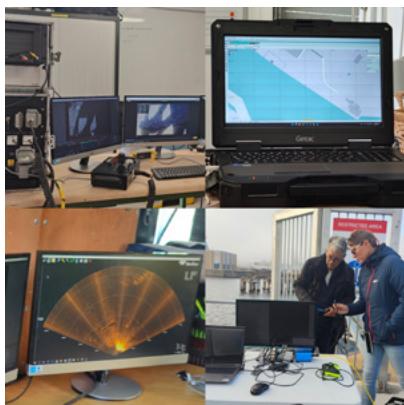


Abb. 3: Teams beim Aufzeichnen und Sammeln von Daten

4. Stand der Technik und Ziele

ROVs kommen häufig bei Präzisionsaufgaben zum Einsatz, bei denen eine direkte menschliche Steuerung erforderlich ist. Sie verfügen über eine Kabelverbindung zur Oberfläche für die Stromversorgung und zur Live-Übertragung von Bild-, Sensor- und Steuerdaten. Außerdem erlauben sie Tätigkeiten in großen Tiefen und gefährlichen Umgebungen, ohne dass Menschen im Wasser sein müssen [11, 12, 13]. Im Unterschied zu Tauchern zeichnen sie sich durch hohe Belastbarkeit und lange Einsatzzeiten aus. Andererseits begrenzt die Kabelverbindung zur Oberfläche die Reichweite und Manövrierbarkeit von ROVs. Da unterscheiden sie sich von den komplexeren, aber auch deutlich teureren AUVs (Autonomous Underwater Vehicles), die selbstständig auf der Basis vorprogrammierter Missionen ohne eine ständige Verbindung zur Oberfläche arbeiten.

ROV-Schnittstellen sind heutzutage mit diversen Sensoren, Navigationshilfen und Steuergeräten ausgestattet, was die Bedienung komplex macht. ROV-Piloten müssen mehrere Displays, Joysticks und Eingabegeräte gleichzeitig nutzen, was bei den beengten Platzverhältnissen an Bord eine schwierige Arbeitsumgebung schafft. Häufig sind wichtige Informationen in minimierten Fenstern verborgen und müssen erst aktiv aufgerufen werden. Siehe dazu [2]. Manuelle Maßnahmen zur Ortung von versenkter Altmunition sind zeitaufwändig, personalintensiv und mit Risiken für das Personal verbunden. Munition liegt häufig auf dem Meeresboden und ist oft teilweise im Sediment vergraben. Zahlreiche Faktoren erschweren die Erkennung, etwa Trübung, Korrosion und Biofouling [11, 12, 13, 14]. Trübung entsteht durch partikuläre Schwebstoffe, die Streulicht verursachen und Sicht und Kontrast optischer Bilder deutlich einschränken. Solche Partikel sind in vielen marinen Umgebungen verbreitet und führen insbesondere bei koaxialer Beleuchtung — wie sie bei vielen ROV-Kameras verwendet wird — zu störenden Reflexionen und reduziertem Bildnutzen [2].

Die Entsorgung großer Mengen chemischer und konventioneller Bomben in europäischen Gewässern nach dem Zweiten Weltkrieg führte zu einer weitreichenden Kontamination des Meeresbodens, die Risiken für die öffentliche Gesundheit und Sicherheit mit sich bringt [11, 12, 13, 14]. Mit fortschreitender Korrosion treten giftige Verbindungen immer häufiger aus, sodass ein dringender Bedarf an wirksamen Methoden zur Erkennung, Identifizierung und Entsorgung besteht. Für die Unterwasserforschung und die Identifizierung von Gegenständen stützen sich die derzeitigen Methoden hauptsächlich auf ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge (ROVs), die mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet sind, darunter Sonar, akustische Echolote und optische Kameras. Der Betrieb herkömmlicher ROVs ist hingegen recht aufwändig und erfordert viel zusätzliche Verarbeitung, umfangreiche Hilfsschiffe und mehrere Bediener. Die Komplexität der Überwachung mehrerer Sensordaten auf unterschiedlichen Displays schränkt die Datengenauigkeit und die Betriebseffizienz erheblich ein.

Standardverfahren zur Bildverbesserung und Kantenerkennung (wie Canny, Sobel und Laplace) versagen häufig unter Wasser bei schlechten Lichtverhältnissen, Trübung und Rauschen und führen aufgrund von visuellen Verzerrungen und Lichtschwankungen zu Fehlalarmen. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden spezielle bionische Datenvorverarbeitungsverfahren entwickelt. Durch die Erhaltung der Objektkonturen und der Farbkonsistenz bei schwankenden Lichtverhältnissen gewährleisten diese Filter eine lichtunabhängige Konturerkennung [15]. Das ermöglicht einen zuverlässigeren Bildvergleich, eine verbesserte Merkmalsextraktion und eine präzisere Klassifizierung von Unterwasserobjekten.

Das Ziel der aktuellen Weiterentwicklungen im Bereich der ROV-Schnittstellengestaltung ist es, mehrere Sensor-Datenströme in einer einzigen, benutzerfreundlichen Betriebsanzeige zusammenzufassen. Die Echtzeitanzeige von Sonar-, optischen und Navigationsdaten wird durch die Integration von Augmented-Reality (AR)- und Virtual-Reality (VR)-Schnittstellen ermöglicht, wodurch zahlreiche

menschliche Bediener und umfangreiche Steuerungssysteme überflüssig werden. Um halbautonome, aufgabenorientierte ROV-Operationen zu ermöglichen, werden außerdem hybride Steuerungsalgorithmen entwickelt, die Methoden des maschinellen Lernens mit physikalischen Modellen kombinieren. Durch das Lernen aus dem Verhalten der Bediener ermöglichen diese adaptiven Steuerungssysteme den ROVs, auch bei wechselnden Gezeiten und Strömungen stabil zu bleiben.

Insgesamt stellen diese technischen Entwicklungen – von intelligenter Steuerung und AR / VR-gestützten Schnittstellen bis hin zur bionischen Bildverbesserung – einen wichtigen Schritt in Richtung Automatisierung und Verbesserung von ROV-basierten Unterwasseroperationen dar [15]. Sie verbessern die Sicherheit und Umweltüberwachung in Gebieten, die von Blindgängern und versenkter Militärmunition betroffen sind, verkürzen die Missionsdauer und erhöhen die Erkennungsgenauigkeit.

5. Methodik

Der Hauptgrund für den Einsatz neuronaler Netze in diesem Projekt ist die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeit der Erkennung potenziell gefährlicher Objekte im und auf dem Meeresboden. Dies geschieht in mehreren Schritten, wie in Abb. 4 dargestellt.

Nach der Vorverarbeitung der Bilddaten und der Integration anderer Sensordaten des Projektpartners IOPAN (z. B. Größe des Objekts, Position) sowie der Vorverarbeitung durch Sensorsoftware (Quincy) und der Vorverarbeitung durch Bionic-Software des Projektpartners Q.VITEC werden die TOI oder NON-TOI durch die trainierte neuronale Netzstruktur erkannt und zur Datenfusion an die endgültige Kategorisierungssoftware übertragen. Das erste neuronale Netzwerk wird für die Kategorisierung in TOI und NON-TOI verwendet. Das zweite neuronale Netzwerk wird für die endgültige Datenfusion verwendet.

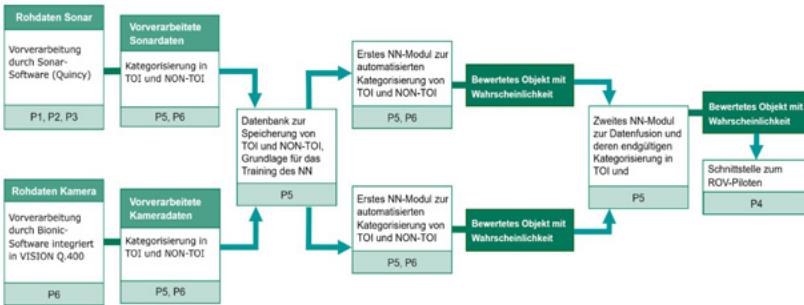


Abb. 4: Workflow von den Rohdaten (Sensor / Kamera) zum Benutzerinterface des ROV-Piloten (P1 – IOPAN, P2 – OceanTech, P3 – GeoEcoMar, P4 – DotOcean, P5 – TU Clausthal, P6 – Q.VITEC)

Die resultierende Software liefert eine Überlagerung von Informationen aus verschiedenen Sensoren, wodurch ein Lagebild erstellt werden kann. Solche Visualisierungen können vom ROV-Piloten in Echtzeit genutzt werden, um effizient zu Punkten von Interesse zu navigieren, wodurch die Lokalisierung und Identifizierung alter Munition erleichtert wird.

Für das Training und Testen der neuronalen Netze wurde Videomaterial von unseren Projektpartnern IOPAN und GEOECOMAR mit einer SD-Kamera, einer HD-Kamera, einer 4K-Kamera und einem Blue View-Sonar aufgenommen. Gemeinsam mit Experten der Projektpartner wurden daraus Datensätze generiert mit Beispielen von Bildern, die TOI-Objekten darstellen, wie auch von Bildern, die NON-TOI-Objekten darstellen. Diese Bilder wurden dann geeignet in Cluster gruppiert, mit einer eindeutigen Kennzeichnung versehen und zusammen mit anderen relevanten Daten (z. B. Datum der Expedition, Koordinaten, Tiefe des Objekts, Größe und Form des Objekts) in einer relationalen Datenbank gespeichert (siehe Abb. 5).

6. Aufbau des Systems

Zwei verschiedene Workflows wurden konzipiert, um den Anwendungen in Entwicklungsphase sowie der späteren Anwendung gerecht zu werden.

Ein Überblick der Architektur der Entwicklungsphase ist in Abb. 6 gezeigt. Alle Bilddaten wurden vorverarbeitet, um sie an die speziellen Anforderungen dieses Projekts anzupassen. Diese bereinigten Daten können via USB oder HDMI an eine Hardware Box übertragen werden, auf der bionische Filter implementiert sind.

The screenshot shows the PgAdmin 4 interface with the following details:

- Servers:** PostgreSQL 15
- Databases:** EROVIMUS (selected)
- Schemas:**
 - non_toi** (highlighted)
 - toi** (highlighted)
 - Subscriptions**
 - postgres**
 - Login/Group Roles**
 - Tablespaces**
- Tables:**
 - non_toi** (under non_toi schema): boxes, iron_barrel, iron_cabinet, iron_cylinder, natural_rocks, planks, unknown_anthropologic_objects, unknown_objects, wooden_branch, wooden_ship_wreck, wreck.
 - toi** (under toi schema): bombs, ghost_nets, shells, torpedos, wooden_boxes.
- Table Data:** A table titled "munition objects" is shown with the following data:

ME_id	hd	sf	af	fork	blueview	location	depth	size	id_object	link
1	bomb2BV	false	false	false	true	Bornholm Deep	94.6	unknown	t002	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\
2	bomb2HD	true	false	false	false	Bornholm Deep	94.6	unknown	t002	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\
3	bomb1SD	false	true	false	false	Bornholm Deep	94	2	t001	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\
4	bomb1BV	false	false	false	true	Bornholm Deep	94	2	t001	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\
5	bomb3SD	false	true	false	false	Bornholm Deep	94.3	unknown	t003	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\
6	bomb3SD	false	true	false	false	Bornholm Deep	94.3	unknown	t003	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\
7	bomb1SD	false	true	false	false	Bornholm Deep	94	2	t001	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\
8	bomb2HD	true	false	false	false	Bornholm Deep	94.6	unknown	t002	Y:\MarTera\Datent\Examples\munition objects\

Abb. 5: Ausschnitt aus der relationalen Datenbank

Zusätzlich dazu integriert die Hardware Box die neuronale Netzstruktur zur Klassifizierung in TOI und NON-TOI, was unabhängig für die einzelnen Sensoren geschieht. Diese Softwaretools wurden aus früheren Arbeiten modifiziert und adaptiert, sie wurden nicht von Grund auf neu entwickelt.

Über eine REST-API werden die Klassifizierungsergebnisse jedes einzelnen Sensors formatiert in JSON an einen Server übermittelt. Hier wird die Gesamtklassifizierung durchgeführt. Neben den Klassifizierungsergebnissen können weitere Daten über die Schnittstelle abgerufen werden, dazu gehören Trainingsdaten sowie Tiefe, Position und andere relevante Informationen.

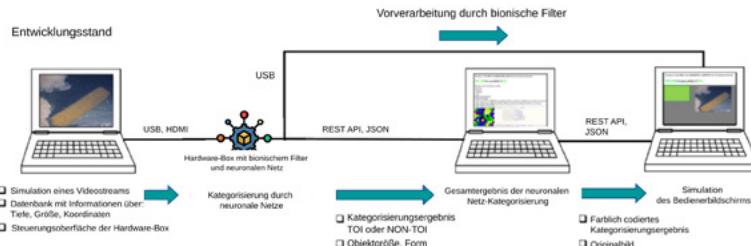


Abb. 6: Architektur während der Entwicklungsphase

Im Anschluss wird das Resultat, ebenfalls als JSON formatiert, über eine weitere REST-API an den ROV-Piloten gesendet. Der Bediener erhält eine Bewertung des Objektes, indem eine farblich gekennzeichnete Kategorie angezeigt wird sowie das originale Bild der Untersuchung.

Die neuronalen Netze und die Trainingsmethoden sind mit der Programmiersprache C++ implementiert, während die Interfaces mit Java und .NET entwickelt wurden. Letztere dienen zur Einstellung der nötigen Parameter und Dimensionen für die neuronalen Netze, zur Verwaltung der Trainingsdaten und zum Einrichten der Vorverarbeitung.

Dieses Design dient hauptsächlich zur Evaluation der neuronalen Netze sowie deren Kategorisierung.

Finale Architektur: Die finale Version des Workflows unterscheidet sich aus mehreren Gründen leicht von der Entwicklungsphase. Anstatt einer Simulation werden hier reale Videostreams genutzt.

Außerdem wurden die Benutzeroberfläche und das Gesamtsystem evaluiert. Eine Übersicht des konzipierten Workflows für das finale System wird in Abb. 7 gezeigt.

Hier werden die Bilddaten über eine VGA-Verbindung zwischen dem Monitor des Bedieners und der Hardware Box übertragen.

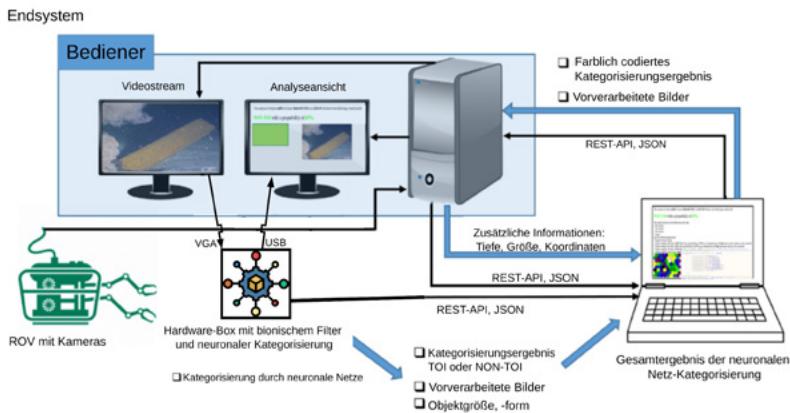


Abb. 7: Konzipierte Architektur für die Bereitstellungsphase

Die Bilder werden nach der Bildvorverarbeitung, die eine Neufärbung und Kontrastverbesserung umfasst, über eine USB-Verbindung an den Monitor des Bedieners zurückgesendet. Über eine REST-API werden die Ergebnisse der TOI- und NON-TOI-Klassifizierung an das Gesamtkategorisierungsprogramm übertragen. Um die Ergebnisse auf dem Monitor anzuzeigen, sendet dieses Softwaremodul zunächst das farbcodierte Klassifizierungsergebnis zurück an den PC des Bedieners, nachdem es die zusätzlichen Daten vom PC des Bedieners in JSON empfangen hat.

Das JSON-Format wird für die Datenübertragung verwendet, da es sich um ein offenes Standardformat für Dateien und den Datenaustausch handelt, das Datenobjekte, die aus Arrays (oder anderen serialisierbaren Werten) und Property-Key-Paaren bestehen, in für Menschen lesbare Textform speichert und überträgt. JSON ist ein

beliebtes Datenformat, das in einer Vielzahl von Anwendungen im elektronischen Datenaustausch, einschließlich Online-Anwendungen und Servern, zum Einsatz kommt. JSON ist außerdem ein Datenformat, das unabhängig von der Sprache funktioniert.

Auf Grundlage des Feedbacks der Projektpartner wurden relevante Parameter für die Kategorisierung festgelegt und in JSON formatiert. Anschließend wurden zwei Datenaustauschstrukturen eingerichtet: eine für die eingehenden Daten vom ROV und den neuronalen Netzen, die die Daten zu TOI und NON-TOI analysieren, und eine weitere für die Ergebnisse der neuronalen Netze, die die Gesamtsituation klassifizieren und dem Bediener im Kontrollzentrum zur Verfügung stellen.

Alle relevanten Informationen, die für eine präzise Gesamtklassifizierung erforderlich sind, werden im ersten JSON-Objekt gesammelt. Allgemeine Informationen wie der Name und das Datum der Fahrt sowie spezifische Informationen wie der Standort und die Tiefe werden im ersten Abschnitt übermittelt. Die folgenden Blöcke dienen zur Erfassung sensorspezifischer Daten, darunter Sonar- und Videodaten. Dazu gehören Angaben wie Größe, Farbe und Sensortyp, die alle eindeutig mit einer bestimmten ID verknüpft sind. Für jedes Objekt mit einer eindeutigen ID sind die für den Betreiber relevanten Informationen im zweiten JSON-Objekt enthalten. Neben den Ergebnissen der einzelnen Sensoren und relevanten Daten wie Objektgröße und -form enthält es auch das Gesamtergebnis der Kategorisierung sowie eine berechnete Wahrscheinlichkeit.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das EROVMUS-Projekt stellt einen wichtigen Fortschritt für den zukünftigen Einsatz von ROVs dar. Durch die Kombination moderner Methoden des maschinellen Lernens und der Datenverwaltung adressiert es Probleme der Objekterkennung in schwierigen Umgebungen. Werden diese Technologien erfolgreich integriert, werden

sich die Einsatzmöglichkeiten deutlich verbessern und die Überwachung versenkter Munition im Meer sicherer und effizienter machen.

In der Maritimen Forschungsstrategie des BMWi von 2025 wird zudem darauf hingewiesen, dass eine automatisierte Detektion und spätere Sanierung von Munitionsversenkungsgebieten im Meer eine notwendige Voraussetzung für die kostengünstige Planung und Bau zukünftiger Offshore-Windparks ist [16].

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurden am Institut für Informatik der Technischen Universität Clausthal Verfahren zur sensorgestützten Detektion und Klassifikation von versenkter Altmunition entwickelt. Grundlage bildet der Einsatz neuronaler Netze zur automatisierten Auswertung und Fusion von Daten verschiedener Sensoren (z. B. Sonar- und Kamerasysteme).

Danksagung

Das Projekt der TU Clausthal wird im Rahmen von Horizon 2020 MarTERA – ERA-NET Cofund on Marine Technologies vom BMWE gefördert und vom Projekträger Jülich begleitet.

Wir möchten uns an dieser Stelle herzlich bei all unseren Projekt-partnern und insbesondere bei Jacek Bełdowski von IOPAN für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Literatur

[1] Bełdowski, J., Klusek, Z., Szubsko, M., Turja, R., Bulczak, A. I., Rak, D., Schmidt, B. (2016). Chemical munitions search & assessment—an evaluation of the dumped munitions problem in the Baltic Sea. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 128, S. 85 – 95.

[2] Bełdowski, J. Submerged chemical weapons in the Baltic Sea Region: the history, impact, and legal instruments. PRACE Instytutu, 51.

- [3] Vanninen, P., Östin, A., Bełdowski, J., Pedersen, E. A., Söderström, M., Szubsko, M., Pączek, B. (2020). Exposure status of sea-dumped chemical warfare agents in the Baltic Sea. *Marine environmental research*, 161, 105112.
- [4] Teigland, H., Møller, M. T., & Hassani, V. (2022). Underwater manipulator control for single pilot ROV control. *IFAC-PapersOnLine*, 55(31), 118 – 123.
- [5] Almeida, C., Martins, A., Soares, E., Matias, B., Silva, P., Pereira, R., Almeida, J. (2024). Vulnerable Marine Ecosystems Survey Pilot Missions with EVA Hybrid AUV / ROV. In *OCEANS*, IEEE, S. 1 – 7.
- [6] Bełdowski, J., Jakacki, J., Grabowski, M., Lang, T., Weber, K., Kotwicki, L., Söderström, M. (2017). Best practices in monitoring. In *Towards the Monitoring of Dumped Munitions Threat (MODUM) A Study of Chemical Munitions Dumpsites in the Baltic Sea*. Springer, S. 213 – 240.
- [7] Czub, M. J., Silberberger, M. J., Bełdowski, J., Kotwicki, L., Muller-Karulis, B., Tomczak, M. T. (2024). Effects of climate and anthropogenic pressures on chemical warfare agent transfer in the Baltic Sea food web. *Science of the Total Environment*, 951, 175455.
- [8] UFORDAT, CUTEC-Institut, URL: https://ufordat.uba.de/UFORDAT/pages/Public_Zeigeansicht_blob.aspx?UUID=VORH-4BEFCA84-7ED5-45FC-9C27-3C23C59A752D:KOER-BE41D12E-4A4C-47D3-A7C6-983D60AB5DE4. Abgerufen am: 10.09.2025.
- [9] Böttcher, C., Knobloch, T., Rühl, N. P., Sternheim, J., Wichert, U., Wöhler, J. (2011). Munitionsbelastung der deutschen Meeresgewässer: Bestandsaufnahme und Empfehlungen, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Sekretariat Bund / Länder-Messprogramm für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (BMLP).
- [10] Jans, W., Reuter, M., Behringer, S., Bohlmann, S. (2012). Probing the seafloor in order to find dumped ammunition and other hazardous materials. In *Future Security Research Conference*, Springer, S. 315 – 326.
- [11] Kammann, U. K. (2023). Umweltkontamination: Quecksilber in Fischen. DOI: 10.3220/CA1671025394000
- [12] Zalewska, T., Grajewska, A., Danowska, B., Rybka-Murat, M., Saniewski, M., & Iwaniak, M. (2023). Warning system for potential releases of chemical warfare agents from dumped munition in the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114930.
- [13] Dąbrowska, J., Sobota, M., Świąder, M., Borowski, P., Moryl, A., Stodolak, R., Kazak, J. K. (2021). Marine waste—sources, fate, risks, challenges and research needs. *International journal of environmental research and public health*, 18(2), S. 433.

- [14] Zhuk, E., Vecalo, M., & Ingerov, A. (2020). The new online Black Sea Oceanographic Database. In EGU General Assembly Conference Abstracts, S. 873.
- [15] Bohlmann, S. (2024). Bionic model of information processing in the retina. In International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA), IEEE, S. 1 – 6.
- [16] Maritime Forschungsstrategie 2025, PTJ, URL: <https://www.ptj.de/projektfoerderung/maritime-forschungsstrategie-2025>, Abgerufen am: 10.09.2025
- [17] Jakacki, J., Andrzejewski, J., Przyborska, A., Muzyka, M., Gordon, D., Nawała, J., Paka, V. (2020). High resolution model for assessment of contamination by chemical warfare agents dumped in the Baltic Sea. Marine Environmental Research, 161, 105079.
- [18] Thijssse, P., Schaap, D., & Fichaut, M. (2020). Delivering marine data from the cloud using the SeaDataCloud Discovery and Access service. In EGU General Assembly Conference Abstracts, S. 8073.
- [19] Bergemann, M., Kadow, C., Illing, S., Kunst, O., Schartner, T., Grieger, J., ... & Ludwig, T. (2020). Free Evaluation System Framework-New Aspects and Features. In AGU Fall Meeting Abstracts, Vol. 2020, S. IN010-06.
- [20] Pecci, L., Fichaut, M., & Schaap, D. (2020). Enhancing SeaDataNet e-infrastructure for ocean and marine data, new opportunities and challenges to foster data re-use. In EGU General Assembly Conference Abstracts, S. 20337.
- [21] Frey, T., Beldowski, J., Maser, E. (2020). Explosive Ordnance in the Baltic Sea: New Tools for Decision Makers. The Journal of Conventional Weapons Destruction, 23(3), S. 11

03SX578

MuWIN

Multi-use floating offshore topside structure for Wind Energy

Autorenliste

GICON

Hauke Hartmann
Rafael Klemenz
Shayan Kindel
Frank Adam

HydroExceed

Fabian Wimmer
Florian Mawick
Renata Loyola
Martin Hoffmann

Universität Rostock

Arash Abbasnia
Sascha Kosleck



1. Zusammenfassung

Die Motivation des Projekts liegt in der Notwendigkeit, Offshore-Windenergie effizient zu nutzen und zugleich Lösungen für Speicherung und Transport zu schaffen. Das MuWIN-Projekt entwickelte dazu eine modulare, skalierbare Offshore-Mehrzweck-Plattform auf TLP-Basis, die an Windparks positioniert und flexibel für verschiedene Anwendungsfälle modifiziert werden kann. Im Fokus steht die Transformation elektrischer Leistung sowie die Erzeugung von grünem Wasserstoff. Die Topside wurde so konzipiert, dass sie neben der schwimmenden Variante auch auf festen Gründungen wie Jacket-Strukturen nutzbar ist.

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der modularen Stahlstruktur entstand ein FEED-Level-Design für eine 400 MW AC-Konverterstation. Für die Wasserstofferzeugung wurden zwei weitere Plattformkonfigurationen entwickelt: eine mit Speicherung und Schiffs-abtransport über Druckwasserstofftanker bzw. als Hochseetankstelle, sowie eine für Pipelineeinspeisung. Simulationen zur Elektrolysekonfiguration und Modulanordnung zeigten, dass die Pipelinevariante besonders bei großen Produktionskapazitäten wirtschaftlicher ist.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen der Topside an die Unterstruktur wurden verschiedene TLP-Designs analysiert und zweistufig verifiziert – zunächst in Kleinstversuchen (1:150), anschließend in Großversuchen (1:40). Dafür betrachtete man verschiedene europäische Standorte und wählte schließlich den Windpark „Talisk“ im Nordwesten Schottlands, um das finale Design unter extremen Bedingungen zu testen.

Abschließend wurde ein Benchmarking-Tool zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Systemkonfigurationen entwickelt und potenzielle Business-Cases überprüft. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für ein DDE-Projekt zur Realisierung einer schwimmenden oder fest gegründeten Mehrzweckplattform.

2. Standortanalyse

Zu Beginn des Projektes wurde eine Design-Matrix erarbeitet, die die Anforderungen an das Design der Plattform abdeckt. Dabei wurden verschiedene Bedingungen wie z. B. die Meerestiefe, Bodenbeschaffenheit, Nähe zur Küste, Sperr- oder Schutzgebiete aber auch die Seegangsbedingungen betrachtet. Basierend hierauf wurden verschiedene existierende sowie potentielle Offshore-Windfarmstandorte innerhalb Europas analysiert. Dies ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt.

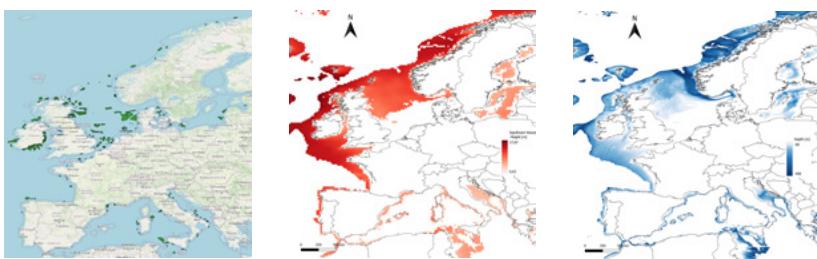


Abb. 1: Wind Farm Standortanalyse

Bei der Durchsicht der meteorologischen und ozeanografischen Daten des Copernicus-Projekts zu den in Abbildung 1(a) markierten potenziellen und vielversprechenden Windstandorten wurde der Standort „Talisk“ als Zielort für die Durchführung der FEED-Level-Studie bestimmt. Dies liegt neben der geeigneten Wassertiefe von 105 – 130m auch an den extremen Wetterbedingungen an diesem Standort im Speziellen durch sehr lange Dünungswellen. Der Standort Talisk befindet sich in Schottland, 80 km von Lewis Island und 80 km vom britischen Festland entfernt. Die FEED-Studie erfordert unter anderem die Ermittlung der maximalen Umweltbedingungen, in Form von Wellen, Wind und Strömung. Die meteorologischen und ozeanografischen Eigenschaften sind in Tabelle 1 in Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeit dargestellt.

Tab. 1: Meteorologischen und ozeanografischen Eigenschaften am Talisk Standort

Parameter	10 Jahre	50 Jahre	100 Jahre
Signifikante Wellenhöhe	12,33 m	14,00 m	14,83 m
Wellen-Peak-Periode	21,45 s	22,71 s	23,08 s
Wind 10 m über MSL	-	-	31,5 m/s
Strömung an der Wasseroberfläche	-	0,55 m/s	-

Dabei wird z. B. die 100-Jahres-Welle für die Analyse des Grenzzustandes der Tragfähigkeit genutzt. Im Gegensatz dazu werden die statistisch gesehen am häufigsten auftretenden Seegangsbedingungen für die Ermüdungsanalyse verwendet. Die Wellenlasten sind der dominierende Umwelteinfluss und der große Bereich verschiedener Wellencharakteristiken zeigt, dass ein nicht lineares numerisches Modell für die Simulation der Strukturantworten genutzt werden muss.

Der Standort demonstriert, dass das entwickelte Design auch unter extremen Bedingungen funktioniert; dank des skalierbaren Unterstruktur-Designs lässt es sich effizient an moderatere Seegangsbedingungen anpassen. Im Rahmen der Business-Case-Analyse wurden weitere Standorte untersucht. Besonders geeignet ist ein Bereich in der Nordsee, wo sich Gode Wind I, DolWin Beta und EuroPipe überschneiden. Dort konzentrieren sich Windparks, Unterwasserstromkabel und eine bestehende Erdgasleitung, sodass vorhandene Infrastruktur genutzt werden könnte. Die Plattform könnte an die Stromkabel angeschlossen werden, um Strom in Wasserstoff umzuwandeln und diesen über EuroPipe einzuspeisen. Da Leitungen bis zu zehn Prozent Wasserstoff aufnehmen können, wäre eine Nachrüstung nicht nötig. Die Nähe zu Häfen wie Bremen ermöglicht zudem, Schiffe direkt auf See zu betanken und so die Hafeninfrastruktur zu entlasten.

3. Entwicklung einer multifunktionalen Topside

3.1 Entwicklung modulare Plattform

Ein zentrales Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines modularen, standardisierten und fertigungsoptimierten Topside-Designs als flexible Plattform für verschiedene Offshore-Anwendungen. Grundlage ist ein strukturelles Raster aus 8×8 m großen geschweißten Stahlmodulen, die mithilfe semi-automatisch gefertigter Profile wie HE 300M weltweit vorgefertigt werden können. Je nach benötigter Kapazität und Anforderungen lassen sich die Module in geeigneten Werften zu unterschiedlichen Konfigurationen zusammensetzen. Der Ansatz unterstützt sowohl die Skalierbarkeit als auch die Vereinfachung von Logistik, Integration und Bauzeitplänen. So können Profile in Asien gefertigt, die Module in Europa vormontiert und nahe dem Installationsort endmontiert werden. Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Aufbau der Grundstruktur eines Interface-Moduls, auf dem alle weiteren Module basieren (siehe Abbildung 2a).

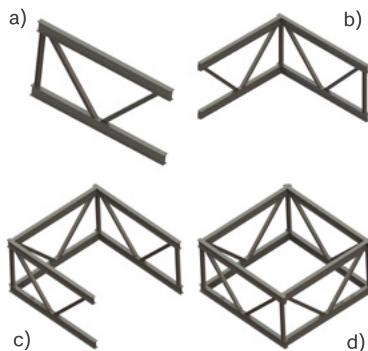


Abb. 2: Zusammensetzen eines 8×8 m Moduls

Abbildung 3 zeigt ein fertig montiertes Modul zur Verbindung mit der jeweiligen Unterstruktur (geeignet zur Anbindung an schwimmende oder gegründete Unterstrukturen).



Abb. 3: Interfache Module – Verbindungselement zur Unterstruktur

In Bereichen besonders hoher Belastungen werden Hilfsrahmen in die bestehenden Module integriert um beispielsweise das hohe Gewicht von Transformatoren oder Shunt Reaktoren aufzunehmen und um die benötigte Steifigkeit an diesen Stellen bereitzustellen. Dieses Konzept lässt sich auf eine Vielzahl von Anwendungsfällen übertragen in dem die Trägertypen entsprechend den zu erwartenden Belastungen angepasst werden. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Installation der Topside auf einer schwimmenden Unterstruktur mithilfe eines Raupenkrans in einem Trockendock. Anschließend können die Komponenten für den jeweiligen Anwendungsfall installiert werden. Dabei können die einzelnen Komponenten je nach lokalen Gegebenheiten sowie den Ansprüchen der Komponenten selbst wahlweise zusammen mit der Stahlstruktur der Topside installiert werden oder alternativ nachträglich.

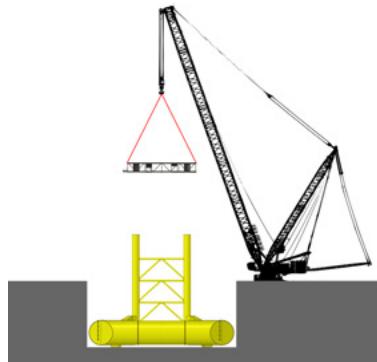


Abb. 4: Installation der Topside auf der Unterstruktur

3.2 Design einer 400MW AC Einheit

Im Rahmen des modularen Plattformkonzepts wurde eine erste Referenzeinheit mit einer elektrischen Leistung von 400 MW ausgearbeitet. Die Stahl-Topside ist in sechzehn standardisierte Module unterteilt, die in einer quadratischen Anordnung (4×4) zu einer Gesamtfläche von rund 1.024 m^2 zusammengefügt werden. Diese Einteilung erlaubt eine effiziente Vorfertigung einzelner Baugruppen sowie eine flexible Anpassung der Struktur an unterschiedliche Anforderungen. Beispielhaft ist dies in Abbildung 5 dargestellt inklusive montierter Hilfsrahmen.



Abb. 5: Stahl-Topside für 400MW AC Einheit

Die elektrische Hauptausrüstung umfasst Hochspannungs-Schaltanlagen, Transformatoren, Shunt Reactor, Mittelspannungsschaltfelder sowie Hilfsstromversorgungssysteme. Ergänzt wird die Anlage durch Betriebs- und Kontrollräume, Batteriesystem sowie Kommunikationssysteme. Für den sicheren Betrieb und Aufenthalt auf See sind zusätzlich Shelter, Rettungsmittel, ein Helideck für den Zugang sowie klar ausgewiesene Flucht- und Rettungswege in das Layout integriert. Für den seeseitigen Zugang per Schiff ist ein Boatlanding vorgesehen.

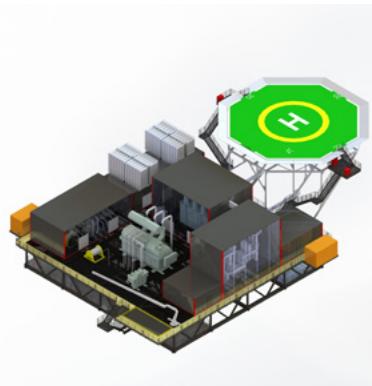


Abb. 6: 400MV AC Einheit

Abbildung 6 zeigt die finale Konfiguration der Topside für den Anwendungsfall einer 400MW AC Converter Platform. Alle sichtbaren Einbausungen sind ebenso modular entwickelt bzw. Standardisiert was eine schnelle und effiziente Endmontage auf einer Werft oder anderen geeigneten Bauplätzen ermöglicht. Durch dieses Prinzip bietet diese Konstruktion ein höchstes Level an Skalierbarkeit.

Die entwickelte Topside wurde dabei so konzipiert, dass sie sowohl in Kombination mit der im Rahmen des MuWIN Projektes entwickelten, schwimmenden TLP-Unterstruktur verwendet werden kann als auch auf festen Gründungen wie z. B. einer Jacket-Struktur. Diese beiden Anwendungsfälle sind in Abbildung 7 exemplarisch dargestellt.

Hierbei wird die Konverterstation auf der schwimmenden Unterstruktur dargestellt und eine Wasserstoffproduktionsplattform auf einer Jacket Struktur. Letztere wurde unter anderem für den zuvor erwähnten Standort in der Nordsee konzipiert.

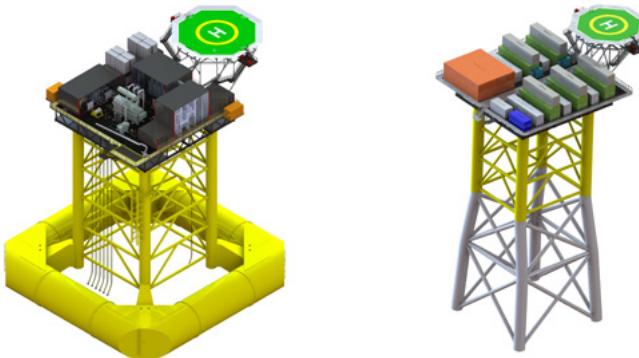


Abb. 7: Konverterstation auf TLP & Wasserstoff Produktionsplattform auf Jacket

3.3 Design von Elektrolyseur und H₂-Speichereinheit

Die Auslegung von Elektrolyseur und Speichereinheit verfolgt einem skalierbar-modularen Ansatz. Da der Wasserstoffmarkt aktuell auf modulare Systeme setzt und großskalige Serienlösungen fehlen, wurde in MuWIN auf marktgängige 5-MW-Module gesetzt. Für die Projektplanung mussten die aktuellen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Mit der HydroExceed-Software HYRIS wurden Produktionspotenziale an Offshore-Standorten simuliert, unter Einbezug von Wetter, Elektrolyseurtypen, Entsalzungsanlagen und Speicher. So ließ sich bestimmen, wie viele Container nötig sind, wie sie transportiert werden könnten und wie die Komponenten optimal zusammenspielen. Es wurden grundsätzlich zwei Varianten untersucht. Eine Containerlösung mit wöchentlichem Austausch erwies sich als technisch herausfordernd: Container begrenzen den Platz für größere Elektrolyseure, Entladevorgänge auf See sind logistisch und zeitlich problematisch und verursachen lange Überführungszeiten und Produktionsunterbrechungen. Ein entsprechender Entwurf mit Containerspeicherung ist in Abbildung 8 dargestellt.

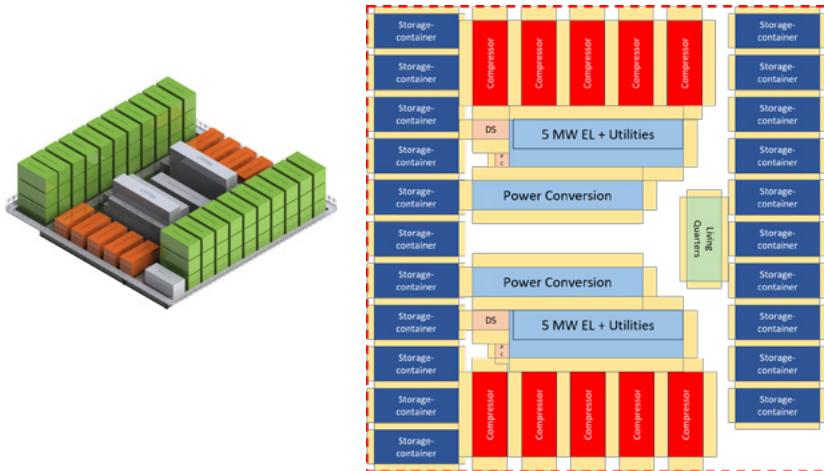


Abb. 8: Containerlösung inkl. Schiffstransport und 10MW Electrolyzer

Diese Einschränkungen führten zur Bevorzugung einer Pipeline-Variante. Trotz höherer Investitionen bietet sie einige Vorteile: Weniger Container, mehr Raum für größere Elektrolyseure, geringere Betriebskosten durch niedrigere Drücke sowie die Möglichkeit eines kontinuierlichen Betriebs mit nur kurzen Standzeiten für Wartung. Im Projektszenario ist ein 30-MW-Elektrolyseur mit Pufferspeicher und leistungsstarkem Kompressor vorgesehen. Die Anordnung der Module wurde in Abstimmung mit dem Plattformdesign optimiert und umfasst Meerwasserkühlung sowie Containerstapelung und wird exemplarisch in Abbildung 9 dargestellt.

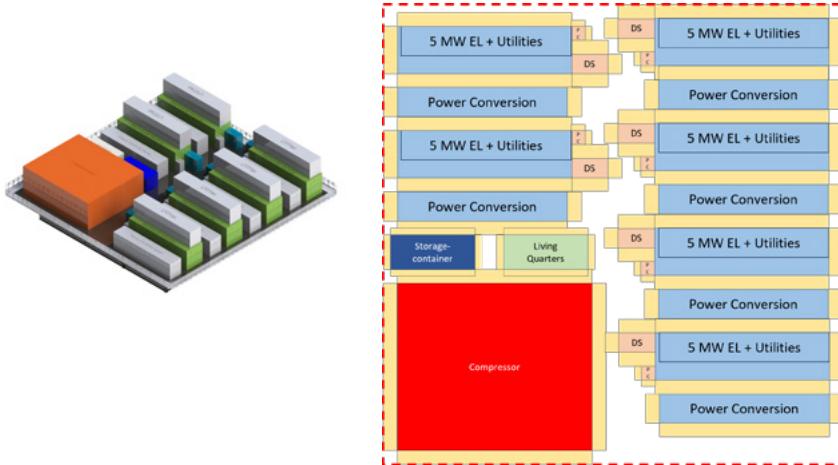


Abb. 9: Pipeline Lösung mit 30MW Elektrolyzer

4. Strukturdesign einer TLP für die Mehrzweckplattform

4.1 Hydrodynamische Untersuchungen Grunddesign

Im Einklang mit den Zielen des Projektes zur Entwicklung einer modularen und skalierbaren TLP-Unterstruktur wurden verschiedene Strukturelemente und Formen untersucht. Dabei wurde sich für die Verwendung zylindrischer Komponenten entschieden, da diese mit einem guten Verhältnis von positiven hydrodynamischen Eigenschaften, langer Lebensdauer und effizienter Serienfertigung aufwarten. Unter Berücksichtigung verschiedener Design-Parameter wie Masse, Tiefgang, Grundfläche und Symmetrie wurden potentielle Designs in drei Kategorien, wie in Abbildung 10 dargestellt, aufgeteilt. Diese Einteilung basiert auf der Auftriebsverteilung, die sich auf die hydrodynamische Eigenschaften der Unterkonstruktion und damit auf die dynamischen Zugbelastungen des Verankerungssystems auswirkt.

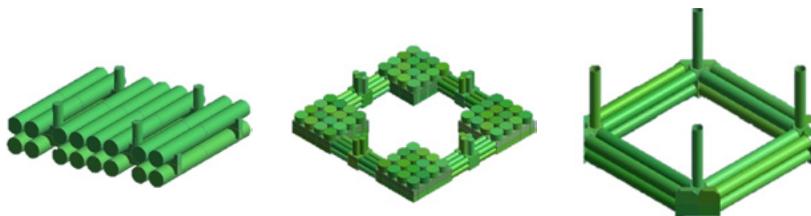


Abb. 10: Klassifizierung von Unterstruktur Designs in Abhängigkeit des Auftriebs

Klasse 1 ist die einfachste Konstruktion, bei der sich der Auftrieb in der Mitte der Grundfläche konzentriert: Bei Klasse 2 erfolgt eine diagonal Dezentralisierung des Auftriebs in den Ecken. Bei Klasse 3 erfolgt eine gleichmäßige ringförmige Auftriebsverteilung. Im Rahmen des Projektes wurden sowohl Designs bestehend aus einer Vielzahl kleinerer Rohre (siehe Abbildung 10) als auch Designs mit einzelnen Rohren mit entsprechend größeren Durchmessern (siehe Abbildung 12) betrachtet. Ziel ist neben einem hydrodynamisch optimierten Design eine schnelle, einfache und kostengünstige Herstellung.

Um die Klassen aus hydrodynamischer Sicher zu beurteilen, wurden aufwändige Analysen durchgeführt, bei denen die einzelnen Klassen unter Verwendung der gleichen Verankerungsseile und einem vergleichbaren Massenauftriebsverhältnis verschiedenen Wellenfrequenzen ausgesetzt wurden. Beispielhaft wird der Einfluss der Auftriebsverteilung in Abbildung 11 anhand der dynamischen Zugbelastung dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass Klasse 3 den geringsten Dynamikbereich aufweist, sodass diese Art der Auftriebsverteilung für das TLP Design verwendet wurde.

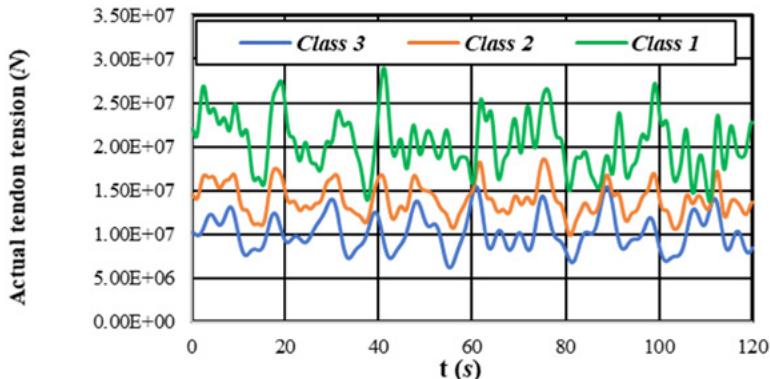


Abb. 11: Vergleich der dynamischen Zugbelastung zwischen den Klassen

4.2 Finales Design der Unterstruktur

Die numerischen Voruntersuchungen haben gezeigt, dass dieses Konzept aus hydrodynamischer Sicht eine Lösung für die Unterstruktur der Mehrzweckplattform sein kann. Im Rahmen des Projektes wurden weitere Modifizierungen am Design mit Fokus auf schnelle und kosteneffiziente Fertigung durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass das erprobte hydrodynamische Grundprinzip der Struktur, die Positionierung der primären Auftriebskörper unterhalb des tiefsten Punktes eines Wellentals sowie eine ringförmige Auftriebsverteilung, erhalten bleibt. Das finale Design der GICON-TLP Unterstruktur für schwimmende Mehrzweckplattformen, zusammen mit der entwickelten 400MW AC Topside in Abbildung 12 dargestellt, basiert grundsätzlich aus drei Hauptkomponenten. Für den primären Auftrieb werden Rohre, wie sie auch für Monopiles in Serienfertigung hergestellt werden, verwendet. Diese werden durch Ecken, welche auf einem verstärkten Rohrstoß basieren, verbunden. Die Anbindung dieser Auftriebssektion an die Topside erfolgt mit einer an Jacket-Strukturen angelehnten Verbindungssektion.

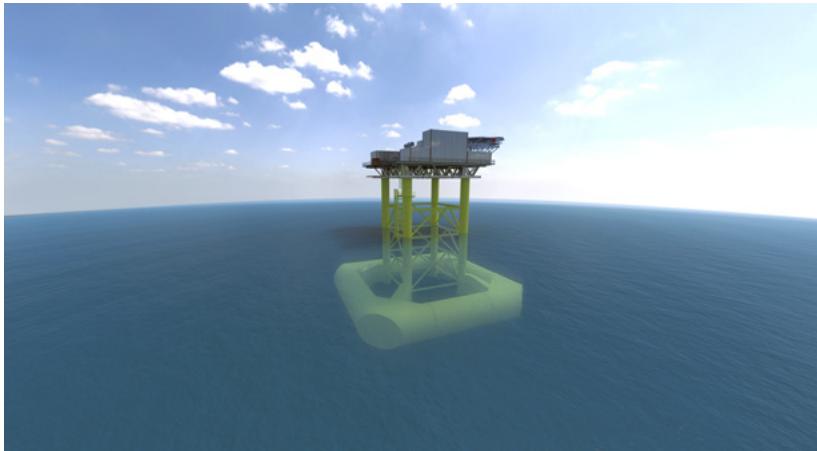


Abb. 12: Finales TLP Design inklusive Topside

Für die Verankerung des TLPs wurden verschiedene Systeme in Betracht gezogen. Grundsätzlich kann die entwickelte schwimmende Plattform mit verschiedenen Verankerungssystemen kombiniert werden. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme sowie der Erfahrungen von GICON wurde ein Verankerungssystem mit Schwergewichtsanker erarbeitet. Dabei werden im Rahmen des FEED Level Designs – zur Erhöhung der Flexibilität für zukünftige Projekte – zwei Varianten einer Schwergewichtslösung in Betracht gezogen. Einerseits die Nutzung eines großen Schwergewichtsankers und andererseits die Nutzung von mehreren kleinen Schwergewichtsankern. Die finale Entscheidung zwischen den beiden Varianten hängt dabei von mehreren Faktoren ab. Beispielhaft seien hier die am Herstellungsort zur Verfügung stehenden Fertigungskapazitäten genannt oder die zur Installation zur Verfügung stehenden Schiffe.

Zum Erreichen des FEED Levels sind zusätzlich die Themen Transport und Installation zu analysieren. Dabei ist zu beachten, dass bei der Installation einer solchen Plattform bereits bei ruhiger See kritische Phasen auftreten wie z. B., wenn die Auftriebskörper, die während des Transportvorgangs für die Stabilität verantwortlich

sind, im Rahmen eines Absenkvorgangs die Wasserlinie unterschreiten. Eine erfolgreiche Installation erfordert daher eine enge Abstimmung von Strukturdesign und Ausrüstung. Das für das GICON-TLP entwickelte Verfahren gliedert sich, wie in Abbildung 13 dargestellt, in fünf Phasen:

1. Schleppen der Gesamtstruktur mit Offshore-Schleppern zum Einsatzort
2. Ballastieren der Auftriebskörper zur Reduktion der Seillasten
3. Die Verbindung zur zuvor installierten Ankerstruktur wird hergestellt
4. Absenken der TLP auf Betriebstiefe
5. Nach Erreichen des finalen Tiefgangs erfolgt das Deballastieren für den finalen Auftrieb

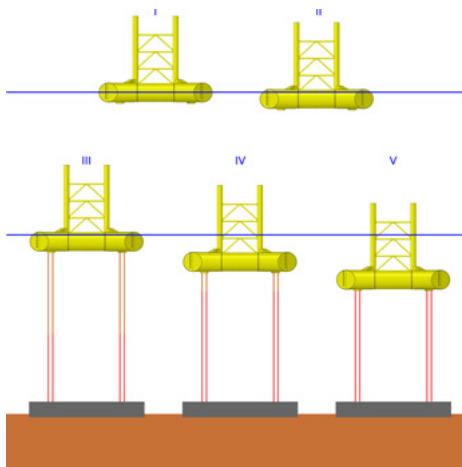


Abb. 13: Schematische Darstellung Installation TLP

4.3 Modellversuche

Zur Verifizierung des entwickelten Designs sowie der verwendeten Simulationsmethoden wurden Modellversuchsserien mit zwei unterschiedlichen Modellmaßstäben durchgeführt. Dabei wurden sowohl der operative Betrieb als auch der Transport- und Installationsvorgang untersucht. In einer ersten Kleinstversuchsserie wurden Ausschwingversuche des installierten TLPs in Längsrichtung sowie Tests in verschiedenen regulären und irregulären Seegängen im Maßstab 1:150 an der IBWPAN durchgeführt. Hierbei wurde ein erster Entwurf der Unterstruktur (siehe Abbildung 14) analysiert

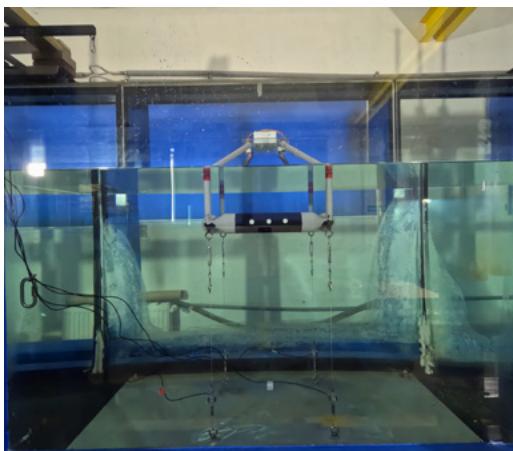


Abb. 14: TLP Modell während der Kleinstversuche

Die Validierung der Eigenfrequenzen ist ein entscheidender Aspekt im Rahmen der Verifizierung numerischer Simulationsergebnisse mit Modellversuchsergebnissen. Beispielhaft werden daher die Ergebnisse der Ausschwingversuche dargestellt. Hierbei wurden die Beschleunigungen der Plattform sowie die Kräfte in den Seilen gemessen und die Eigenperioden mittels Fourier-Transformation bestimmt (siehe Abbildung 15). Die ermittelte Eigenfrequenz von 0,3879 Hz ist dabei ca. 8 % höher als das Ergebnis der numerischen Simulation mit 0,358 Hz. Unter Berücksichtigung von unter anderem Imperfektionen in den Modellversuchen ist dies eine angemessene Übereinstimmung.

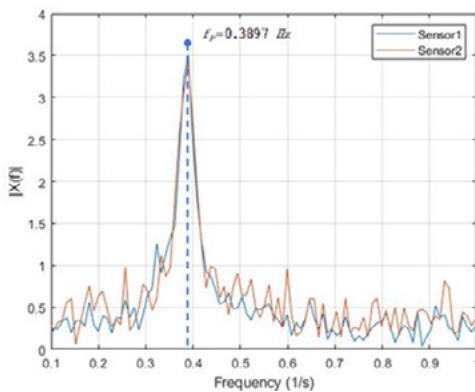


Abb. 15: Bestimmung der Eigenperiode mittels Fourier-Transformation

Im späteren Verlauf des Projektes erfolgten weitere Versuchsserien mit der finalen Unterstruktur (Maßstab 1:40) in der Versuchsanstalt MARIN. Hierbei wurde der operative Betrieb getestet sowie die kritische Phase des Transports und Installationsvorgangs (siehe Abbildung 16).

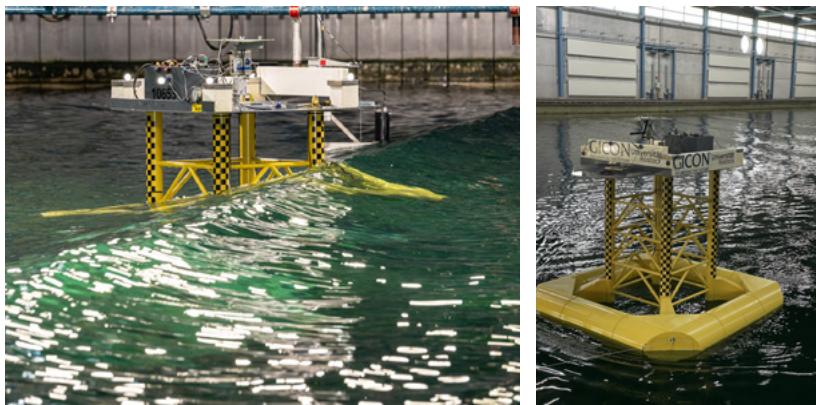


Abb. 16: Modellversuche des finalen Designs bei MARIN

Hierbei hat sich bestätigt, dass die GICON-TLP für eine Mehrzweckplattform in der Lage ist, selbst den kritischsten Seegangsbedingungen am Talisk Standort standzuhalten. Ein Vergleich

der Versuchsergebnisse mit den Simulationen hat eine sehr gute Übereinstimmung gezeigt. Dabei konnte von den vorher durchgeführten Versuchen im kleineren Maßstab profitiert werden, da mit Hilfe dieser die Simulationsmodelle bereits geprüft und angepasst wurden. Hierdurch ließen sich notwendige Versuchszeiten der kostenintensiveren Großversuche reduzieren.

Zum Vergleich mit den Kleinstversuchen werden im Folgenden ebenfalls die Eigenperioden der Ausschwingversuche in Tabelle 2 dargestellt und mit den numerischen Ergebnissen verglichen.

Tab. 2: Vergleich der Eigenperioden zwischen Modellversuchen und Simulationen

Parameter	Modellversuche [s]	Numerische Simulation [s]	Delta [%]
Längsbewegung	27.6	27.6	0 %
Querbewegung	27.6	27.6	0 %
Tauchen	1.34	1.38	3 %
Rollen	1.57	1.60	2 %
Stampfen	1.57	1.60	2 %
Gieren	20.5	20.1	2 %

Die Vergleiche zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den numerischen und den experimentellen Daten mit einer maximalen Abweichung von 3 % in translatorischen und 2 % in rotatorischen Freiheitsgraden. Der Vergleich zeigt, dass das entwickelte numerische Modell dazu in der Lage ist, eine schnelle Skalierung der Unterstruktur für andere Standorte und Topside-Abmessungen zu gewährleisten und für zukünftige Entwicklungen der schwimmenden Unterstruktur genutzt werden kann.

5. MuWIN Business Case

In diesem Forschungsprojekt entstanden zwei Tools zur frühzeitigen Kostenschätzung und Dimensionierung für eine schwimmende Mehrzweckplattform sowie die Wasserstoffproduktion. Sie funktionieren eigenständig, sind jedoch so entwickelt, dass sie sich optimal ergänzen und somit einen vollständigen Überblick über die Wirtschaftlichkeit geben.

5.1 Kosten & Dimensionierungstool Topside

Das Tool wurden entwickelt, um bereits in der FEED-Phase eine Bewertung der voraussichtlichen Investitionskosten (CAPEX), des Gewichts und des Platzbedarfs für Topsides, die für Offshore-Anwendungen vorgesehen sind, durchzuführen. Im ersten Schritt wählt der Nutzer den Verwendungszweck der Topside aus – entweder als Konverterplattform oder als Wasserstoffproduktionsplattform (siehe Abbildung 17). Auf Grundlage dieser Auswahl wird die erforderliche Leistungsklasse definiert. Zusätzlich können hier standortabhängige Parameter vergeben wie z. B. die erwartete Auslastung eines Offshore Windparks

Bzgl. der Fertigung, Installation und Transport kann eine Strategie abhängig vom ebenso wählbaren finalen Standort vorgegeben werden. Hier kann ein individueller Kompromiss aus Kosten, Zeitplan und Risiko gewählt werden.

5.2 Kostentool – Wasserstoffproduktion

Das Kosten-Tool zur Modellierung von CAPEX und OPEX für unterschiedliche Wasserstoff-Plattformkonfigurationen berücksichtigt technische Parameter wie Elektrolysekapazität, Wasserverbrauch, Transportentfernung und Strompreis, sowie wirtschaftliche Kennzahlen wie ROI und Amortisationszeit. Dank seiner transparenten Struktur erlaubt es eine schnelle Bewertung verschiedener Plattformoptionen. Nutzer können so früh erkennen, welche Varianten wirtschaftlich sinnvoll sind, und unwirtschaftliche Ansätze ausschließen. Das Tool ist zudem erweiterbar, um zusätzliche Parameter oder spezifische Anlagendaten zu integrieren. Die Modell-

berechnungen der vorgestellten Beispielplattformen zeigen (siehe Abbildung 18): Trotz höherer Investitionen von rund 111 Millionen Euro erreicht die Pipeline-Option nach etwa vier Jahren die Gewinnschwelle, während sich die Schiffstransportvariante mit 33 Millionen Euro Investition erst nach sieben Jahren amortisiert hat.

INPUT Section	
Selection	
Type	Converter Plattform
Capacity AC [MW]	Please select
Capacity H2 [MW]	Converter Plattform
Dimensions	Hydrogen Production Plattform
Weight of components	Please select
 Please enter	
Lifetime [years]	25
Capacity Factor	53%
Availability	95%
 Please select fabrication strategy	
pre-fabrication	Vietnam
topside assembly	Please select
mating	Portugal
	Scotland
	Vietnam

Abb. 17: Eingabeparameter des Topside Tools

Costs / Return on Investment (ROI) - Ship Transportation		
Electrolyzer Purchase Cost	€	11,518,084 €
Desalination Plant Purchase Cost	€	862,496 €
Storage Containers Purchase Cost	€	15,250,000 €
Compressor Purchase Cost	€	5,500,000 €
Transportation Costs for the Vessel Option	€/year	4,759,834 €
Maintenance Cost	€/year	120,000 €
Pipeline Cost	€	69,399,990 €
Platform Cost	€	93,983,428 €
Fixed Costs for the Vessel Option	€	33,130,580 €
Return on Investment (ROI) for the Vessel Option - Topside	year	7
Return on Investment (ROI) for the Vessel Option - Total	year	25

Costs / Return on Investment (ROI) - Pipeline Transport		
Electrolyzer Purchase Cost	€	34,394,252 €
Desalination Plant Purchase Cost	€	2,587,487 €
Storage Containers Purchase Cost	€	500,000 €
Compressor Purchase Cost	€	5,000,000 €
Maintenance Cost	€/year	120,000 €
Pipeline Cost	€	69,399,990 €
Platform Cost	€	93,983,428 €
Fixed Costs for the Pipeline Option	€	111,381,729 €
Return on Investment (ROI) for the Pipeline Option - Topside	year	4
Return on Investment (ROI) for the Pipeline Option	year	7

Abb. 18: Darstellung Ergebnis H₂-Kostentool

5.3 Entwicklung MuWIN Business Case

Der erarbeitete Business Case untersucht zum einen die technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer schwimmenden 400-MW-AC-Konverterplattform. Im Zentrum steht die modulare Bauweise der Topside, bestehend aus sechzehn standardisierten Modulen. Dieses Konzept erlaubt eine dezentralisierte Vorfertigung in kostengünstigen Werften (z. B. Portugal, Vietnam) sowie die Endmontage nahe dem Einsatzort, wodurch Transport- und Installationsrisiken sinken.

Im Vergleich zu fest gegründeten Plattformen ergeben sich klare Vorteile: geringere CAPEX-Risiken durch planbare Fertigungskosten, Vermeidung von Heavy-Lift-Schiffen, reduzierte Offshore-Arbeitsphasen, höhere Sicherheit in Werftumgebungen und Zeitersparnis durch parallele Vorfertigung. Zudem ist das Plattformkonzept skalierbar – auf größere Leistungen (z. B. 600 oder 800 MW) und alternative Anwendungen wie Wasserstoffproduktion oder Offshore-Hubs. Ab einer bestimmten Leistung ist eine zweite Ebene wirtschaftlicher als eine vergrößerte Einzelebene. Die Gesamtinvestition für die 400-MW-Referenzeinheit liegt mit etwa 150 Mio. € im erwarteten Korridor internationaler Vergleichsprojekte. Der Anteil für Transport, Installation und Inbetriebnahme (~32 %) liegt unter dem Branchendurchschnitt und unterstreicht die Vorteile des modularen Onshore-Verbindungsansatzes. Damit bestätigt die Analyse einen wirtschaftlich tragfähigen, technologisch skalierbaren Ansatz, der insbesondere in tiefen Gewässern wie an der Talisk-Site in Schottland überzeugt.

Der Business Case vergleicht außerdem die beiden Hauptkonfigurationen für die Offshore-Produktion von grünem Wasserstoff – Containerlösung mit Schiffstransport und Pipelineeinspeisung – hinsichtlich Investitionsvolumen, Betriebskosten und Rentabilität. Zwar erfordert die Containerlösung geringere Anfangsinvestitionen, doch hohe Transportkosten und technische Einschränkungen machen sie langfristig unattraktiv. Die Pipeline-Variante ist kapitalintensiver, ermöglicht jedoch höhere Elektrolyseleistungen, kontinuierlichen Betrieb und deutlich niedrigere Betriebskosten.

Auch die Standortfrage wurde berücksichtigt. Besonders attraktiv sind Gebiete mit bestehender Offshore-Infrastruktur wie Windparks, Stromkabeln und Erdgasleitungen. Sie senken Einstiegskosten und eröffnen Optionen wie direkte Netzeinspeisung oder Hafenanbindung. Ein weiterer Faktor sind die erwarteten Markttrends: sinkende Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien und steigende CO₂-Preise verbessern die Wirtschaftlichkeit von grünem Wasserstoff und machen künftige Projekte attraktiver. Insgesamt bestätigt die Analyse die Pipeline-Variante als langfristig tragfähigste Option. Sie bietet Skalierbarkeit, reduziert logistische Abhängigkeiten und überzeugt durch eine günstige Kostenstruktur – eine verlässliche Grundlage für Investitionsentscheidungen für zukünftige Offshore-Wasserstoffprojekte.

6. Wirtschaftliche Verwertung

Die wirtschaftliche Nutzung der Projektergebnisse erfolgt auf zwei Ebenen: zum einen durch die kommerzielle Verwertung der von GICON und HydroExceed entwickelten Plattformkonzepte, zum anderen durch die Integration der Resultate in das operative Tagesgeschäft.

HydroExceed plant, sein Portfolio im Bereich Wasserstoffspeicherung und -verteilung auszubauen und neue Dienstleistungen sowie Produkte für Versorgungsinfrastrukturen und Betankungsanlagen zu entwickeln. Die Zusammenarbeit mit Beiratsmitgliedern wie Siemens Energy und PETRONAS unterstützt die Markteinführung und erhöht die internationale Sichtbarkeit des Konzepts. Damit trägt das Projekt direkt zur Stärkung der Wettbewerbsposition im wachsenden Markt für grünen Wasserstoff bei.

Für GICON stellen die Ergebnisse eine konsequente Erweiterung des Portfolios im Bereich Offshore-Wind dar. Das Unternehmen hat bereits erheblichen Aufwand in die Entwicklung schwimmender Offshore-Windturbinen investiert, insbesondere in das GICON-SOF. Darüber hinaus hat GICON in der Vergangenheit umfassende

Planungsleistungen für Offshore-Windparks mit gegründeten wie auch schwimmenden Unterstrukturen erbracht. Um künftig auch Planungsleistungen für schwimmende Offshore-Windparks in größerer Entfernung zur Küste anbieten zu können, sind schwimmende Strukturen für Konverterstationen sowie passende Topsides zwingend erforderlich. Sie verschaffen dem GICON-Portfolio eine starke Ausgangsposition für den Ausbau schwimmender Offshore-Windenergie. Das hier entwickelte Topside-Design kann zudem auf gegründete Plattformen übertragen werden und erweitert so die Einsatzmöglichkeiten.

Zusätzlich zur Wirtschaftlichen Nutzung durch die Firmen GICON & HydroExceed dienen die erarbeiteten Ergebnisse der Universität Rostock als Basis für weitere Forschungsvorhaben, da sie die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des entwickelten Computersimulators zur Bewertung nicht nur des MuWIN Entwurfs, sondern auch weiterführender Entwürfe unter verschiedenen Umweltbelastungen unter Beweis gestellt haben.

03SX585

CLINER-ECO

Bewertung und Untersuchung von Multi-Fuel-Retrofitlösungen für den klimaneutralen Kraftstoff e-Methanol zum Betrieb in maritimen Großmotoren

Autorenliste

Everlence SE

Eric Lauer
Valentin Scharl
Bhuvaneswaran Manickam

Technische Universität Darmstadt – STFS

Jannis Reusch
Jannick Erhard

WTZ Roßlau gGmbH

Karsten Stenzel
Robert Meinert
Phillip Thorau



1. Einleitung

Die maritime Industrie steht vor einem tiefgreifenden Wandel. Im Juli 2023 hat die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO) im Rahmen der 80. Sitzung des Meeresumweltausschusses (MEPC 80) ihre Klimastrategie deutlich verschärft. Die neuen Ziele sehen vor, dass die Treibhausgasemissionen der internationalen Schifffahrt bis 2030 um mindestens 20 % (angestrebt: 30 %), bis 2040 um mindestens 70 % (angestrebt: 80 %) und bis etwa 2050 vollständig klimaneutral werden sollen – jeweils im Vergleich zum Basisjahr 2008 [1].

Ein zentrales Hindernis bei der Dekarbonisierung der Schifffahrt ist die lange Lebensdauer maritimer Hauptantriebssysteme. Laut einer Analyse von Hydrogen Europe auf Basis des Clarksons World Fleet Register beträgt das durchschnittliche Alter der globalen Flotte derzeit über 13 Jahre – mit vielen Schiffen, die 25 Jahre und länger im Einsatz bleiben [2]. Diese technische Beständigkeit macht Retrofitlösungen besonders attraktiv, da sie bestehende Flotten ökologisch und wirtschaftlich zukunftsfähig machen können – ohne auf den langsamten Flottenneubau angewiesen zu sein.

Grünes Methanol bietet sich als besonders geeigneter alternativer Kraftstoff an. Laut einer Studie von DLR und Greenpeace, kann der Einsatz von Methanol die CO₂-Emissionen über den Lebenszyklus eines Schiffes erheblich reduzieren [3]. Methanol ist flüssig, einfach zu bunkern und birgt geringe Umweltrisiken. Anders als Wasserstoff oder Ammoniak erfordert es keine komplexe Tankinfrastruktur und kann mit geringen Anpassungen an Hafenanlagen genutzt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts CliNeR-ECo wird die Umrüstung bestehender Schiffsmotoren auf den klimaneutralen Kraftstoff Methanol untersucht. Ziel ist die Entwicklung praxisnaher Retrofit-Konzepte, die eine signifikante Reduktion von Treibhausgasemissionen im maritimen Sektor ermöglichen. Die Technische Universität Darmstadt führt dazu grundlegende Experimente zur Gemischbildung an einer Flow-Bench durch und ergänzt diese durch numerische Strömungssimulationen. Am WTZ Roßlau gGmbH

werden Einzylinderversuche durchgeführt, um die Verbrennungsprozesse unter realitätsnahen Bedingungen zu analysieren. Die Firma Everllence übernimmt die Übertragung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in das industrielle Umfeld. Sie adaptiert darüber hinaus geeignete Einspritzkomponenten und untersucht den Einfluss des Methanolbetriebs auf das Gesamtsystem Schiff – von der Kraftstoffversorgung, über die Abgasnachbehandlung bis zur Integration in bestehende Bordnetze und Betriebsabläufe.

2. Methanol Retrofit von Schiffsmotoren

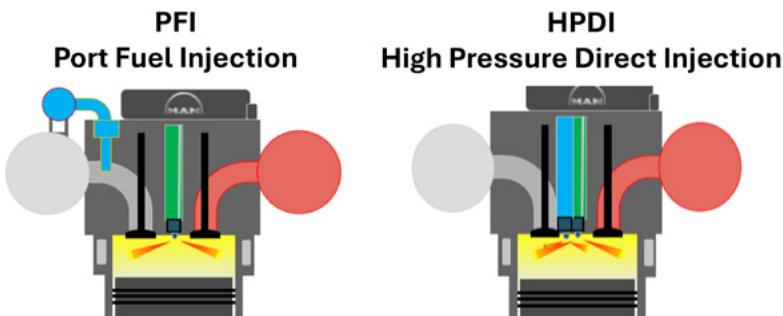


Abb. 1: Konzepte zur Methanolverbrennung [4]

Methanol weist Eigenschaften auf, die sowohl eine Anwendung im Otto- als auch im Dieselprozess ermöglichen. Aufgrund seiner niedrigen Cetanzahl ist Methanol ohne zusätzliche Zündquelle für den Dieselprozess ungeeignet. Durch den Einsatz von Zündhilfen wie Diesel-Pilotinjektionen kann jedoch ein Dual-Fuel-Betrieb realisiert werden. Die hohe Oktanzahl und die hohe Selbstzündtemperatur qualifizieren Methanol gleichzeitig als Otto-Kraftstoff.

Besonders hervorzuheben ist die starke Kühlwirkung durch die hohe Verdampfungsenthalpie, die im Dieselbetrieb zu einer signifikanten Reduktion der NOx-Emissionen führt. Im Otto-Betrieb beeinflusst dieser Effekt jedoch den Zündverzug der Pilotinjektion. Die geringe Viskosität und der niedrige Heizwert von Methanol stellen zusätzliche

Anforderungen an das Einspritzsystem, insbesondere hinsichtlich Druckniveau und Düsendesign.

Zwei zentrale Konzepte zum Betrieb eines Methanolmotors können unterschieden werden: das Hochdruck-Direkteinspritzverfahren (HPDI) für den Dieselzyklus und die Niederdruck-Saugrohreinspritzung (PFI) für den Ottozyklus (Abb. 1). Während HPDI hinsichtlich maximaler Motorleistung und Emissionsverhalten Vorteile bietet, überzeugt das PFI-Konzept durch seine einfache Nachrüstbarkeit und geringere Systemkomplexität. Insgesamt zeigt sich Methanol als vielversprechender Kraftstoff für zukünftige Dual-Fuel-Anwendungen, wobei innerhalb CliNeR-ECo – aufgrund der leichteren Umsetzbarkeit im Retrofit – der Schwerpunkt auf dem PFI-Brennverfahren lag. Der Methanolinjektor kann im Einlasskanal eines bestehenden Motors ohne umfangreichen Austausch von Bauteilen integriert werden (Abb. 2). Dies vereinfacht die Umrüstung an Bord und senkt die Umbaukosten.

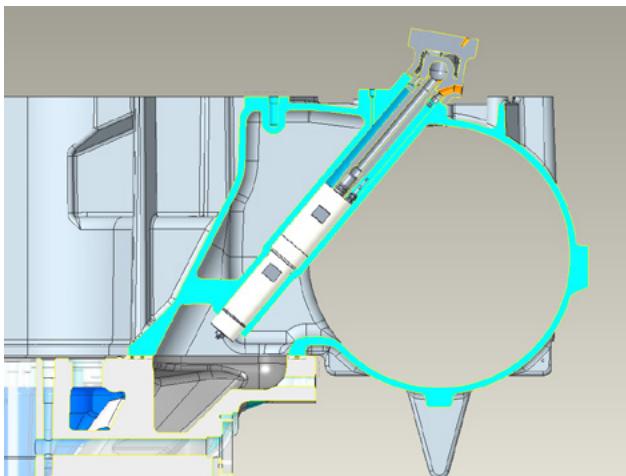


Abb. 2: Integration eines Methanolinjektors im Einlasskanal

3. Grundlagen der Gemischbildung an einem Strömungsprüfstand

Im Vergleich zu Diesel weist Methanol eine deutlich höhere Verdampfungsenthalpie auf, was die Gemischbildung und die Wandbenetzung maßgeblich beeinflusst. Um die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse besser zu verstehen und numerische Simulationen validieren zu können, wurde am Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik (RSM) der Technischen Universität Darmstadt ein Strömungsprüfstand entwickelt und aufgebaut (Abb. 3). Er ermöglicht optischen Zugang sowohl zu Einlassstrecke und Einlasskanal als auch zum Brennraum.

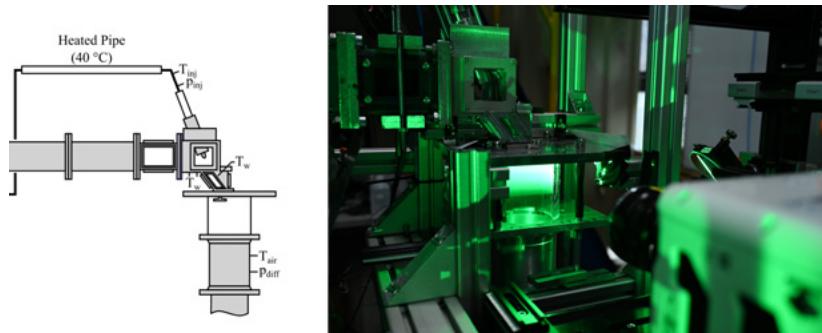


Abb. 3: Schematische Abbildung der Flow-Bench (links) und Fotografie während einer PIV-Messung (rechts)

Am Strömungsprüfstand wurden hochauflösende optische Messungen durchgeführt. Zunächst wurde die Interaktion zwischen Strömung und Spray im Einlasskanal mithilfe der Diffuse Backlight Illumination (DBI) visualisiert (Abb. 4, links). Eine hohe optische Dichte (OD) steht für eine hohe Tropfendichte im Spray. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Luftmassenströme und Injektionsdrücke eingesetzt. Zudem wurde die Position des Injektors variiert, um eine günstige Sprayausbreitung und -homogenität zu identifizieren. Mit derselben Methode wurde untersucht, wie viel Kraftstoff bei

unterschiedlichen Betriebsbedingungen in Tropfenform in den Brennraum transportiert wird (Abb. 4, rechts).

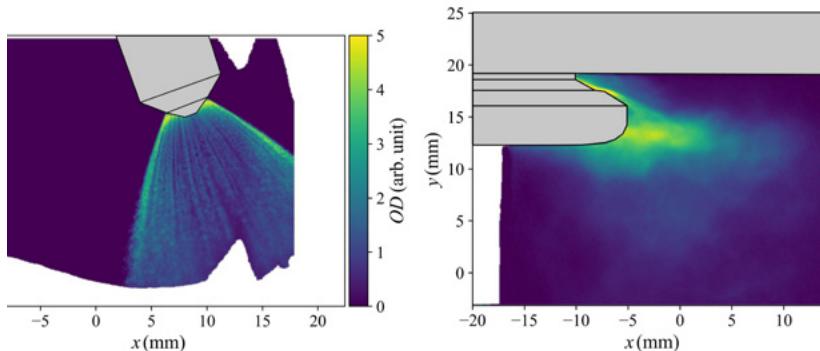


Abb. 4: DBI-Aufnahmen von der Spray-Entwicklung im Einlasskanal (links) und im Brennraum (rechts)

Gleichzeitig wurden punktuelle Wandtemperaturmessungen durchgeführt. Über mehrere Injektionszyklen hinweg zeigt sich ein Temperaturabfall an den Stellen, an denen das Spray auf die Wand trifft. Aus der resultierenden Abkühlrate lassen sich die Auftreffpunkte des Sprays und die potenzielle Filmbildungen auf der Wand identifizieren (Abb. 5).

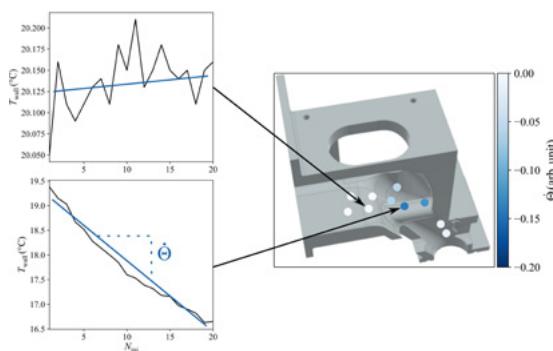


Abb. 5: Abkühlrate über mehrere Injektionen an verschiedenen Messpunkten der Einlassgeometrie

Da das Strömungsfeld im Brennraum einen großen Einfluss auf die Gemischbildung hat, wurde es mit Hilfe von High-Speed Particle Image Velocimetry (PIV) gemessen. Diese Messungen wurden sowohl in der Symmetrieebene zwischen den Einlassventilen als auch in der Ventilebene durchgeführt. Die gemittelten Strömungsfelder sind in Abb. 6 dargestellt.

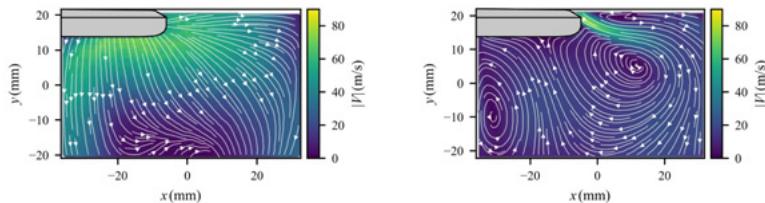


Abb. 6: Gemittelte Strömungsfelder in der Symmetrie- (links) und in der Ventilebene (rechts)

In den nächsten Schritten sollen die Entstehung von Wandfilmen an den optischen Zugängen sowie die Gemischbildung im Brennraum detailliert untersucht werden. Dabei kommt tracerbasierte Laser Induced Fluorescence (LIF) zum Einsatz, um die lokale Kraftstoffverteilung zu bestimmen.

4. Numerische Optimierung der Gemischbildung und des Methanol-Brennverfahrens

Am Institut Simulation reaktiver Thermo- Fluidsysteme (STFS) wurde ein Modell aufgebaut, das die Strömung, die instationäre Sprayentwicklung und den Tropfenaufprall auf die Wand berücksichtigt. Ziel ist die realitätsnahe Simulation der Gemischbildung und der zeitlichen Wandfilmentwicklung, um ein Auslegungswerkzeug für die Methanol-Saugrohreinspritzung bereitzustellen.

Ausgangspunkt der Simulationen zur Gemischbildung ist die grundlegende Charakterisierung der eingesetzten PFI-Injektoren und die darauf aufbauende Spraymodellierung. Um die von Hydraulic-Flip dominierte Spraymorphologie der Hollow-Cone-Injektoren in einem

Euler-Lagrange-Framework realistisch abzubilden, wurde ein neues Injektionsmodell implementiert. Die als Eingangsgröße verwendeten Tropfengrößenverteilungen der Injektoren wurden mittels Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA) ermittelt. DBI-Messungen dienten als Validierungsgrundlage der Spraymorphologie. Abb. 7 zeigt beispielhaft für den Bosch HDEV4-Injektor den signifikanten Einfluss der neuen Strähnen-Injektionsmodellierung auf Spraymorphologie und flüssige Eindringtiefe.

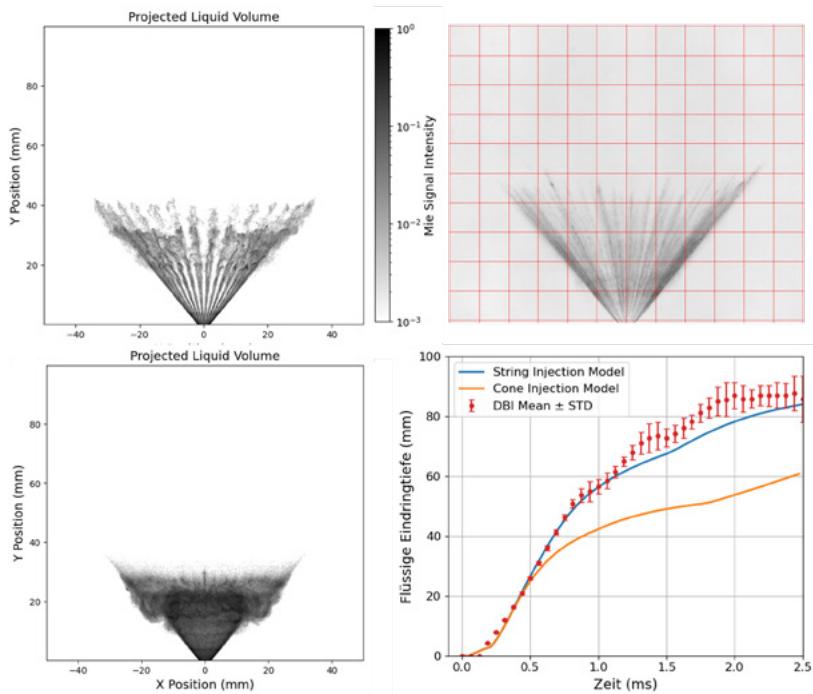


Abb. 7: Abgleich Spraymodellierung mit DBI-Messungen des Bosch HDEV4 Injektors bei 50 bar Einspritzdruck und 1 bar Kammerdruck. Strähnen-Injektionsmodell (oben links), ConeNozzle-Injektionsmodell (unten links), DBI-Messung (oben rechts), Vergleich flüssige Eindringtiefe (unten rechts)

Die Gasströmung in der Flow-Bench wurde im Projekt mit RANS- und LES-Turbulenzmodellierungen untersucht. Während LES eine detaillierte Analyse des Turbulenzeinflusses auf die nachgelagerte Modellierungskette erlaubt, ermöglicht sie auch ein Assessment geeigneter Turbulenzmodelle für rechenzeitoptimierte RANS-Simulationen. Die Strömungsfelder wurden mit High-Speed PIV validiert; ein Beispiel des Strömungsfeldes einer RANS Simulation mit $k-\omega$ Modellierung ist in Abb. 8 dargestellt (vgl. Abb. 6).

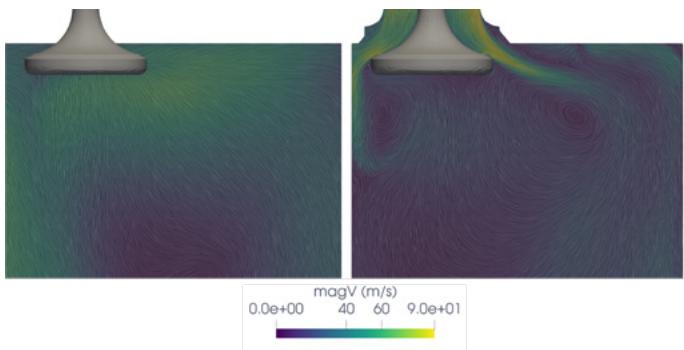


Abb. 8: Strömungsfeld der RANS Simulation bei 250 kg/h Einströmung in der Symmetrie- (links) und Ventilebene (rechts) des Brennraums

Zur Identifikation signifikanter Einflüsse auf die Gemischbildung wurde die Spraymodellierung in die Simulation der Flow-Bench integriert (Abb. 9). Vorab-Rechnungen mit RANS-Turbulenzmodellierung weisen auf einen starken Einfluss der Wandfilmbildung hin. Die Spray-Wand-Interaktion, die Wandfilmverdampfung sowie das durch Scherkräfte verursachte Aufbrechen des Wandfilms – quantifizierbar über die Weber-Zahl – sind daher zentrale Elemente der Modellierungskette. Experimentelle Detailuntersuchungen der Wandfilmdynamik wurden daher an einer generischen Flow-Bench durchgeführt. Auf deren Basis wurde die Modellierung der Methanol-Wandfilmverdampfung angepasst und in den Löser implementiert. Um das mögliche Aufbrechen des Wandfilms abzubilden, wurden aktuelle Modelle aus der Literatur in das Simulationsframework integriert.

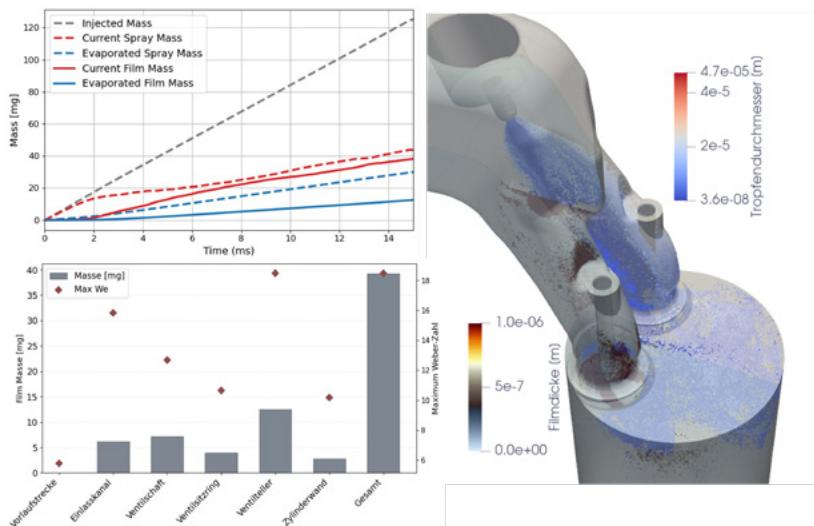


Abb. 9: Methanolbudget von Spray, Wandfilm und Gasphase (links oben); Masse und maximale Weber-Zahl des Wandfilms zum Einspritzungsende (links unten); räumliche Verteilung des Sprays und Wandfilmdicke (rechts)

Die ganzheitliche Simulation ermöglicht eine gezielte Optimierung der Gemischaufbereitung auf Basis quantifizierbarer Größen und bildet die Grundlage für weitere Arbeiten.

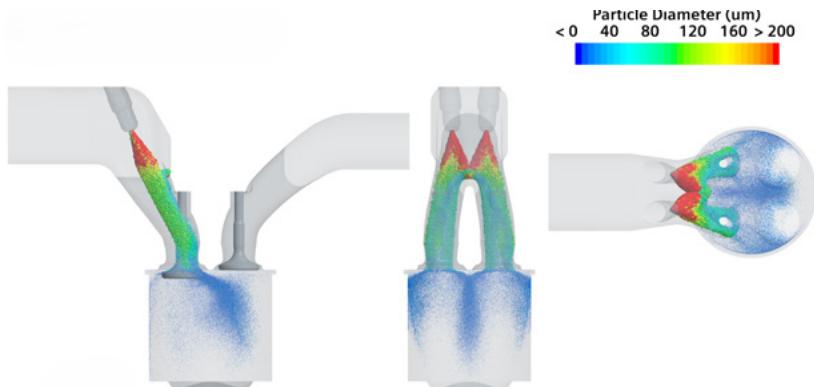


Abb. 10: Methanol spray während des Ansaugtaktes

Everllence überträgt die grundlegenden Untersuchungen der TU Darmstadt zur Gemischbildung in einen industriellen Workflow auf Basis des kommerziellen CFD-Tools Star-CCM+. Dabei wird der vollständige Ladungswechsel eines Motors inklusive Ventil- und Kolbenbewegung simuliert. Die Validierung des Workflows erfolgt durch Vergleich mit den Flow Bench-Versuchen der TU Darmstadt. Der entwickelte Workflow wurde bereits erfolgreich eingesetzt, um die Position der Methanoleinspritzung sowie des Einspritzzeitpunktes für den Prüfstandsbetrieb am Einzylindermotor zu optimieren (Abb. 10, [5]). Der Fokus lag auf der Vermeidung von Wandfilmen in kritischen Bereichen sowie der Optimierung der Gemischbildung (Abb. 11).

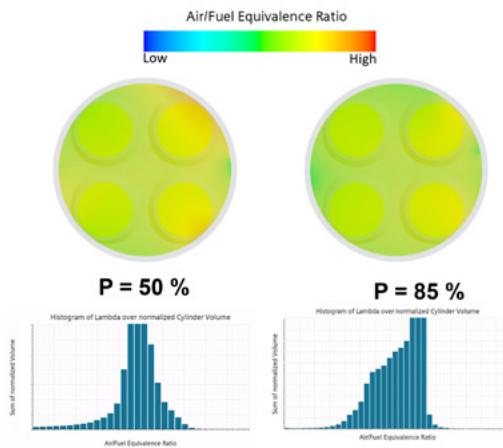


Abb. 11: Methanolverteilung im Brennraum [5]

5. Motorische Untersuchungen am WTZ Roßlau

Die motorischen Untersuchungen am WTZ Roßlau erfolgten an zwei unterschiedlichen Einzylinder-Forschungsmotoren. Zunächst wurden gezielte Vorversuche an einem kleineren, schnelllaufenden Aggregat mit der Bezeichnung FM18 durchgeführt. Ziel war es, weiterführende Technologien sowie alternative Brennverfahren zu evaluieren und

dabei gleichzeitig durch den reduzierten technischen Aufwand die Versuchskosten zu minimieren.

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten lag jedoch auf einem größeren, mittelschnelllaufenden Motor vom Typ 1L32/44. An diesem wurden die eigentlichen Retrofit-Konzepte für verschiedene Basis-Dieselmotoren erprobt. Im Fokus stand dabei die Darstellung möglichst hoher Methanolanteile über das gesamte Kennfeld hinweg, um durch die Umrüstung bestehender, fossil betriebener Flotten eine signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen zu erzielen.

Die wichtigsten Kenndaten der verwendeten Einzylinder-Forschungsmotoren sind in Tab. 1 zusammengefasst. Abb. 12 zeigt die beiden Versuchsträger im Überblick, die sich durch eine hohe Flexibilität bei der Anpassung motorischer Randbedingungen auszeichnen. Für die Versuchsreihen kamen dabei Motorkomponenten des Projekt-partners Everlence zum Einsatz. Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die Optimierung des Verbrennungsprozesses. Dabei lag der Fokus auf der Erhöhung der realisierbaren Methanolanteile, der Steigerung des Wirkungsgrads, der Sicherstellung einer stabilen Verbrennung sowie der Reduktion von Emissionen. Um diese Ziele zu erreichen, wurden die Forschungsmotoren mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet.

Tab. 1: Motorparameter der Einzylinder-Forschungsmotoren FM18 und 1L32/44

Parameter	Einheit	FM18	1L32/44
Kolbenhub	mm	215	440
Zylinderbohrung	mm	175	320
Zylinderanzahl	-	1	1
Hubvolumen	dm ³	5,17	38,39
Nenndrehzahl	min-1	1800	750
Diesel-Einspritzsystem	-	Common-Rail	Divers

Parameter	Einheit	FM18	1L32/44
Methanol-Einspritzung	-	PFI, LPDI	PFI
Verdichtungsverhältnis	-	Variabel	Variabel
Nockenwelle	-	Variabel	Variabel



Abb. 12: Einzylinder-Forschungsmotoren FM18 und 1L32/44

Im Rahmen der motorischen Untersuchungen wurden zahlreiche Betriebsparameter gezielt variiert, darunter die Ladelufttemperatur, das Verbrennungsluftverhältnis, der energetische Methanolanteil sowie die Einspritzstrategien für Diesel und Methanol. Ergänzend dazu erfolgten auch Anpassungen an der Motorhardware. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf den Retrofit-Gedanken gelegt, mit dem Ziel, eine einfache Adaption des Grundmotorkonzepts ohne tiefgreifende Eingriffe in die bestehende Struktur zu ermöglichen.

Die erzielbaren Methanolanteile sowie die wesentlichen Motorparameter am FM18 bei Verwendung eines modernen Common-Rail-Einspritzsystems sind in Abb. 13 dargestellt [6].

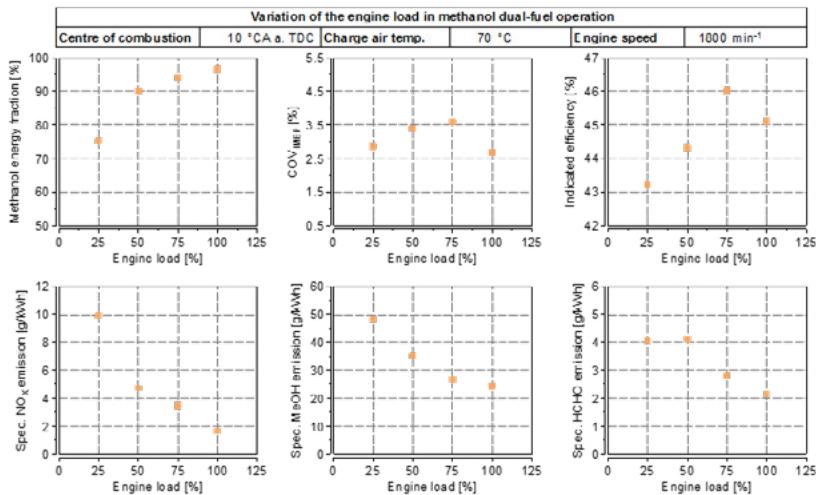


Abb. 13: Erreichbare Methanolanteile und ausgewählte Motorkennwerte am FM18 [6]

Die Untersuchungen am FM18 zeigen, dass im Methanol-Dual-Fuel-Betrieb sehr hohe energetische Methanolanteile realisierbar sind. Beim Vollastpunkt wurden Werte von bis zu 96,5 % erreicht. Bei niedriger Teillast war hingegen nur ein Anteil von 75 % möglich, da ansonsten ein hoher Methanol-Schlupf und ungünstige Verbrennungsschwerpunktlagen auftreten, was die Effizienz beeinträchtigt. Die Druckanstiegsraten lagen bei allen Lastpunkten bei rund 100 bar/ms. Die Verbrennungsstabilität war mit einem COVIMEP um 3 % sowie COVpmax unter 5 % auf gutem Niveau. Durch reine Optimierung der Betriebsparameter, ohne Änderungen an der Hardware, konnte der Methanolanteil bei Vollast im Vergleich zu den ersten Ergebnissen um über 55 % gesteigert werden. Zugleich lagen die Stickoxid-, Methanol- und Formaldehyd-Emissionen auf einem sehr niedrigen Niveau.

Am Einzylinder-Forschungsmotor 1L32/44 wurden zwei unterschiedliche Pilot-Einspritzsysteme der zugrunde liegenden Basis-Dieselmotoren miteinander verglichen. Zum Einsatz kamen einerseits ein mechanisch gesteuertes Pumpe-Düse-System und andererseits ein modernes Common-Rail-Einspritzsystem, das eine präzise Applikation

kleinster Einspritzmengen sowie Mehrfacheinspritzungen erlaubt. Die im gesamten Betriebskennfeld erreichbaren Methanolanteile für das konventionelle Einspritzsystem sind in Abb. 14 dargestellt.

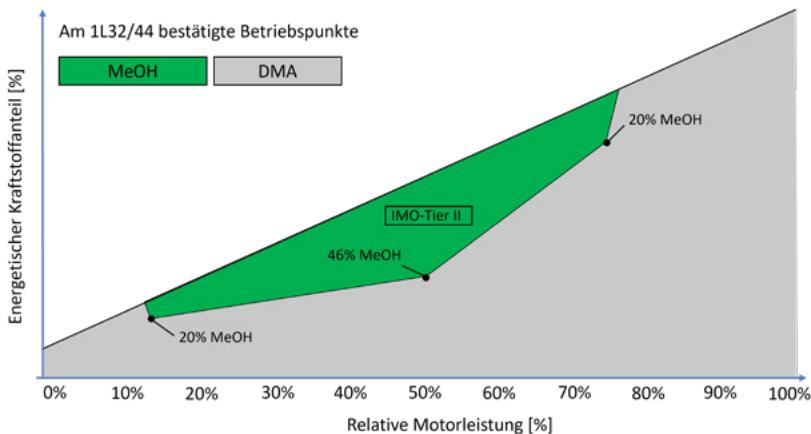


Abb. 14: Erreichbare Methanolanteile am 1L32/44 (konventionelles Diesel-Einspritzsystem)

Der maximal erreichbare Methanolanteil im Dual-Fuel-Betrieb wird vor allem durch mechanische Grenzen und Fehlzündungen limitiert. Das eingespritzte flüssige Methanol hat eine stark kühlende Wirkung auf die Zylinderladung, was zu längeren Zündverzügen des Diesels und damit zu höheren Druckanstiegsraten oder sogar Fehlzündungen führen kann. Bei den untersuchten Methanolanteilen zeigt der Motor ein stabiles Betriebsverhalten, das durch die diffusive Dieselverbrennung geprägt ist. Dieses Konzept lässt sich treffend als „Co-Burning von Methanol im Dieselmotor“ beschreiben. Im Vergleich zum reinen Dieselbetrieb sind nur wenige zusätzliche Komponenten erforderlich: Methanoleinspritzventile, ein Methanol-Kraftstoffversorgungssystem, entsprechende Steuerungsfunktionen im Motorsteuergerät sowie Regelungen für Ladeluftdruck und -temperatur.

Abb. 15 zeigt die erreichbaren Methanolanteile im Kennfeld bei Verwendung des Common-Rail-Einspritzsystems. In weiten Lastbereichen arbeitet der Motor dabei mit einer Otto-ähnlichen Verbrennung im

Magerbetrieb, wobei die bekannten, aber gut kontrollierbaren Sensitivitäten eines Ottomotors auftreten. In diesem Betriebsbereich können die IMO-Tier-3-Emissionsgrenzwerte ohne Abgasnachbehandlung eingehalten werden. Die Umsetzung dieser fortschrittlichen Dual-Fuel-Strategie wird maßgeblich durch das Common-Rail-Pilot-Einspritzsystem, die variable Ventilsteuerung und einer adaptive Verbrennungsregelung ermöglicht. Die maximale Methanolanteile bei höherer Last sind aufgrund der Klopfgrenze limitiert. Der Motor musste dort nach dem zuvor beschriebenen Co-Burning-Konzept betrieben werden. In diesem Modus können nur die IMO-Tier-2-Grenzwerte eingehalten werden.

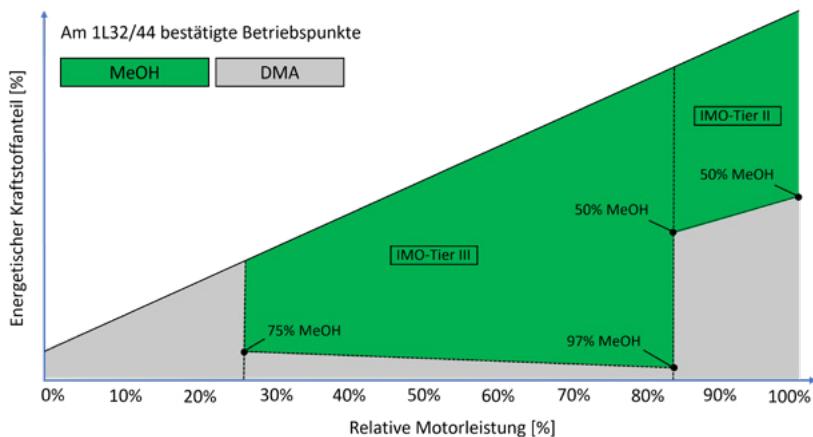


Abb. 15: Erreichbare Methanolanteile am 1L32/44 (Common-Rail-Einspritzsystem)

6. Methanol-Retrofit im Gesamtsystem Schiff

Die Verwendung von Methanol als alternativer Kraftstoff stellt neue Anforderungen an die Abgasnachbehandlung von Verbrennungsmotoren. Im Vergleich zu Dieselmotoren entstehen bei der Methanolverbrennung deutlich geringere Emissionen von Stickoxiden (NO_x), Schwefeloxiden und Partikeln. Gleichzeitig treten jedoch neue Schadstoffe auf, insbesondere Formaldehyd und unverbranntes Methanol. Zur effektiven Reduktion dieser Schadstoffe ist der Einsatz eines speziell abgestimmten Oxidationskatalysators erforderlich. Versuche zeigen, dass insbesondere das Vorhandensein von NO_x die Oxidationsaktivität stark beeinflusst: Während NO die Methanolkonversion hemmt, kann NO_2 als starkes Oxidationsmittel die Umwandlung fördern – allerdings auch die Bildung von Formaldehyd verstärken. Daher wurden Strategien untersucht, wie Oxidations- und SCR-Katalysatoren gezielt kombiniert an Bord von Schiffen eingesetzt werden können.

In CliNeR-ECo hat Everlence verschiedene Beschichtungen für Oxidationskatalysatoren systematisch untersucht. Dazu wurden Waben im Synthesegaslabor und am Motorprüfstand mit Abgas gezielt gealterte und verschwefelt (Abb. 16). So konnten ideale Katalysatorbeschichtungen identifiziert werden, die eine hohe Aktivität bei gleichzeitig geringer Schadstoffbildung aufweisen. Es wurden Regenerationsstrategien für gealterte Katalysatoren entwickelt, um die Langzeitstabilität und Effizienz zu verbessern.

Die Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zur sicheren und emissionsarmen Nutzung von Methanol in zukünftigen Motorenkonzepten und bilden die Basis für die Integration von Abgasnachbehandlungssystemen in Serienanwendungen.



Abb. 16: Neue Katalysatorwabe (links) und Katalysatorwabe nach Alterung (rechts)

Die Nachrüstung bestehender Schiffe mit Methanolinfrastruktur stellt auch eine erhebliche logistische Herausforderung dar. Der begrenzte Bauraum an Bord und die engen Transportwege innerhalb des Schiffes erschweren die Integration zusätzlicher Komponenten wie Tanks, Leitungen und Sicherheitseinrichtungen. Neben dem Platzbedarf müssen auch sicherheitsrelevante Aspekte berücksichtigt werden, da Methanol als giftiger und leicht entzündbarer Kraftstoff besondere Anforderungen an Leckageüberwachung, Belüftung und Brandschutz stellt.

In CliNeR-ECo wurde ein generelles Sicherheitskonzept für den Umgang mit Methanol entwickelt und dieses in enger Abstimmung mit relevanten Klassifikationsgesellschaften geprüft. Das Konzept bildet die Grundlage für die sichere Integration von Methanol als alternativer Schiffskraftstoff.

Ein konkretes Beispiel für die praktische Umsetzung der Methanol-integration in existierende Schiffsdesigns ist der Entwurf eines modularen Methanol-Skits (Abb. 17). Es besteht aus mehreren vormontierten Baugruppen, die einzeln über die engen Zugänge des Schiffs zum Installationsort transportiert und dort vor Ort montiert werden können.

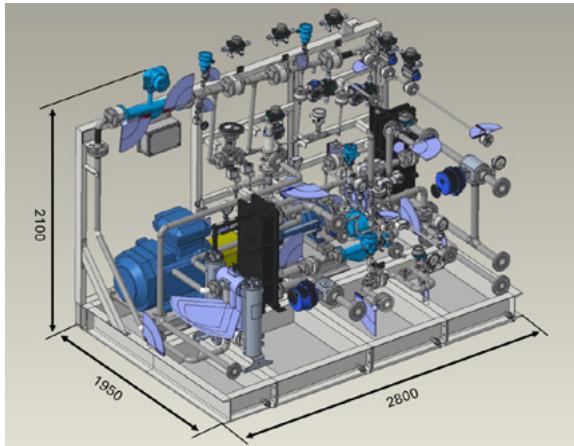


Abb. 17: Methanol-Skid zur Kraftstoffversorgung an Bord

7. Wirtschaftliche Verwertung und praktischer Einsatz der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus dem Projekt CliNeR-ECo bilden die Grundlage für mehrere industrielle Entwicklungsaktivitäten zur Einführung von Methanol als alternativen Kraftstoff in Serienmotoren. Bereits während des Projektverlaufs konnten zwei Retrofit-Konzepte für bestehende Motorplattformen abgeleitet werden. Für die Baureihe 21/31 wurde ein besonders einfaches Co-Burning-Konzept entwickelt, das eine parallele Verbrennung von Methanol und Diesel ermöglicht. Für diesen Motor wurde bereits ein Type Approval mit einer CO₂-Einsparpotential größer 40 % erreicht.

Für die technisch anspruchsvollere Baureihen wurde ein Dual-Fuel-Konzept erarbeitet, mit dem energetische Substitutionsraten von 75 % bis 97 % über große Teile des Kennfelds am Einzylinderprüfstand erreicht wurden. Basierend darauf hat Everllence in einem internen Entwicklungsprojekt bereits ein 51/60 Retrofit für Methanol-anwendung entwickelt. Erste Prüfstandmessungen des 51/60R-DF-M bestätigen die CliNeR-ECo-Projektergebnisse.

8. Zusammenfassung und Ausblick

CliNeR-ECo hat gezeigt, dass Methanol ein vielversprechender alternativer Kraftstoff für die maritime Industrie ist – insbesondere im Kontext von Retrofitlösungen für bestehende Großmotoren. Durch die Kombination analytischer Untersuchungen, numerischer Simulationen und praktischer Prüfstandtests konnten zentrale Herausforderungen bei der Gemischbildung, Verbrennung und Schiffsintegration identifiziert und adressiert werden. Die Ergebnisse belegen, dass mit geeigneten Einspritzstrategien und angepasster Motorhardware energetische Methanolanteile von über 95 % in einzelnen Lastpunkten realisierbar sind. Die Integration von Methanol in das Gesamtsystem Schiff wurde konzeptuell durch die Entwicklung modularer Versorgungseinheiten und Sicherheitskonzepte praxisnah unterstützt.

Ausblickend bietet CliNeR-ECo eine belastbare Grundlage für die industrielle Umsetzung von Methanol-Retrofitlösungen. Die entwickelten Konzepte werden bereits in Serienentwicklungen überführt, wobei erste Prüfstandergebnisse die Projektergebnisse bestätigen. Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Skalierung der Retrofitlösungen für unterschiedliche Schiffstypen konzentrieren. Damit leistet CliNeR-ECo einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung der internationalen Schifffahrt und zur Erreichung der Klimaziele.

Literatur

[1] Pressemitteilung Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: BMWE – Internationale Seeschiffahrts-Organisation (IMO) beschließt Klimaneutralität bis 2050, 2023.

[2] Auswertung basierend auf Daten von Clarksons World Fleet Register; Green Technology Tracker: Record Investments in Alternative Fuel | Clarksons, 2025.

[3] F. Dingfeld, A. Fitz, S.K. Esfeh, T. Schwedt, M.J. Simon-Schultz, T. Teske; Grünes Methanol als alternativer Schiffskraftstoff, Grünes Methanol als alternativer Schiffskraftstoff, 20250403_Studie_Gruenes_Methanol.pdf, 2025

[4] C. Kunkel, P. Hagl, B. Manickam, C. Gross, F. Eppler; Methanol Retrofits for a fast net-CO₂ reduction in the Marine Market, Tagungsband der 13. Dessauer Gasmotoren-Konferenz, 2024

[5] B. Manickam, C. Wagner, D. Krnac, E. Lauer, P. Holand, M. Auer; Development of dual fuel methanol engine using CFD techniques for PFI and HPDI injection strategies, 8th Rostock Large Engine Symposium, DOI: 10.18453/rosdok_id00004630, 2024

[6] K. Stenzel, P. Thorau, L. Beckmann, F. Schirrmeister, C. Reiser, B. Buchholz; Experimental investigations of a methanol dual-fuel combustion process for marine engines, CIMAC Congress Zürich, 2025

03SX586

meOHmare

CO₂-neutrale schnelllaufende Marine-Verbrennungsmotoren auf Basis regenerativ erzeugten Methanol

Autorenliste

Rolls-Royce Solutions

Dr. Johannes Kech
Steffen Theiß
Dr. Julian Eder
Lukas Bundschuh

Woodward L'Orange

Andreas Kühner

WTZ Roßlau

Carsten Tietze



1. Zusammenfassung

Mit dem Ziel, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, untersucht Rolls-Royce Solutions verschiedene alternative Kraftstoffe, wobei insbesondere Methanol als e-Fuel, hergestellt aus regenerativen Energiequellen, als vielversprechender Kraftstoff der Zukunft gilt. Im Rahmen von meOHmare liegt daher der Fokus auf der Entwicklung eines schnelllaufenden Methanol-Verbrennungsmotors, der gemeinsam mit den Projektpartnern Woodward L'Orange und der WTZ Roßlau gGmbH zum Vollmotor-Versuchsträger entwickelt wird. Methanol als Kraftstoff hat zwar zahlreiche Vorteile gegenüber anderen alternativen Kraftstoffen, nicht nur in Bezug auf die Energiedichte und -speicherung, sondern auch auf die verbrennungsrelevanten Eigenschaften. Methanol bringt jedoch auch einige Herausforderungen für die Motorenentwicklung mit sich. In diesem Beitrag werden die Herausforderungen beschrieben, die im Zuge der Methanol-Motorenentwicklung auftreten. Der Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Methanol-Einspritz- und Verbrennungskomponenten, wobei der aktuelle Stand der Technik, sowie das Motorkonzept eines fremdgezündeten PFI-Methanol-Marinemotors dargestellt wird.

2. Einleitung

Da die Schifffahrtsindustrie mit strengen Zielen zur Reduzierung von Treibhausgasen und zunehmendem regulatorischen Druck konfrontiert ist, ist der Bedarf an nachhaltigen, kosteneffizienten und effizienten Antriebslösungen dringender denn je. Neben den allgemein gültigen IMO-Emissionsvorschriften [1] hat die Europäische Union im Rahmen des European Green Deal im Jahr 2021 das „Fit for 55“-Paket verabschiedet. Bei dem Paket handelt es sich um eine breit angelegte Gesetzgebungsinitiative, die darauf abzielt, die Treibhausgasemissionen in vielen Sektoren, einschließlich des Seeverkehrs, zu senken. In der Schifffahrt zielt das Programm derzeit vor allem auf große Handelsschiffe (oberhalb einer bestimmten Bruttoraumzahl von 5.000 Bruttoregistertonnen) ab, die einen erheb-

lichen CO₂-Fußabdruck aufweisen und EU-Häfen anlaufen [2]. Auch wenn derzeit keines der Instrumente des EU-Programms „fit for 55“ Auswirkungen auf Hafenschlepper, Fähren oder andere Schiffe hat, die typischerweise in einem Marktsegment für mtu-Motoren angesiedelt sind, übernimmt Rolls-Royce Solutions (RRS) die Verantwortung, auch Eignern und Betreibern von Schiffen die Möglichkeit zu bieten, freiwillig Antriebslösungen mit höchstmöglicher Umweltverträglichkeit zu nutzen.

Der in meOHmare entwickelte Motor folgt der Leitanwendung Hafenschlepper. Diese Motoren müssen ihre Leistung unter einigen der anspruchsvollsten Bedingungen in der kommerziellen Schifffahrt erbringen. Die dynamischen Manöver verlangen vom Hauptantrieb unter allen Umgebungsbedingungen ein optimales Fahr- und Reaktionsverhalten. Aber auch Manöver von Fähren mit ihrem hohem Vollastanteil werden im Zuge der Entwicklung mitberücksichtigt. Für eine neue Motorenentwicklung sind folgende Fähigkeiten zwingend erforderlich, wenn sich der Motor auf diesen Märkten durchsetzen soll:

- Hohes Maß an Sicherheit
- Hohe Zuverlässigkeit
- Niedrige Lebenszykluskosten
- Drehmomentreserve für anspruchsvolle Manöver
- Anpassungsfähigkeit an den Niedriglastbetrieb
- Agiles Beschleunigungs- und Ansprechverhalten
- Ausreichende Leistungsreserve bei niedrigen Drehzahlen
- Hohes Verhältnis von Leistung zu Volumen

Darüber hinaus sollten die Investitionskosten auf einem akzeptablen Niveau liegen, um es Werften zu ermöglichen, den Motor in neuen Schiffsbauvorhaben einzusetzen. Gleiches gilt für das gesamte Kraftstoffsystem. Aus Erfahrungen mit alternativen Antriebskonzepten geht hervor, dass die Akzeptanz einer neuen Technologie steigt, wenn sich die Betreiber des neuen Produktes nicht auf völlig neue Konzepte einstellen müssen. Daher wird stets ein „Diesel like Handling und Performance“ des Methanolmotors angestrebt.

3. Methanol-Motorenentwicklung

Rolls-Royce Solutions (RRS) begann bereits im Jahr 2020 mit der Entwicklung der Methanol-Technologie. An einem Einzylinder-Forschungsmotor wurde die generelle Machbarkeit einer reinen Methanolverbrennung im relevanten Leistungsbereich demonstriert. Zu diesem Zeitpunkt gab es jedoch keine Komponenten für schnelllaufende Methanolmotoren im Leistungssegment von >100 kW/Zyl. auf dem Markt. Daher wurde Anfang 2023 das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte gemeinsame Entwicklungsprojekt meOHmare gestartet, das bis Anfang 2026 gemeinsam mit den Partnern Woodward L'Orange und WTZ Roßlau die erforderliche Technologie für einen schnelllaufenden Methanol-Single-Fuel-Schiffsmotor entwickeln wird.

Der Schwerpunkt des Projektes meOHmare liegt auf der Entwicklung eines Methanol-Kraftstoffsystems mit Hochdruck-Kraftstoffversorgung, Kraftstoffleitungen und die Einspritzkomponenten, sowie die Entwicklung der Verbrennungstechnologie und -konzepten. Weiterhin wird dazu parallel an Sicherheitskonzepten für den Prüfstand und auch für den späteren maritimen Einsatz entwickelt.

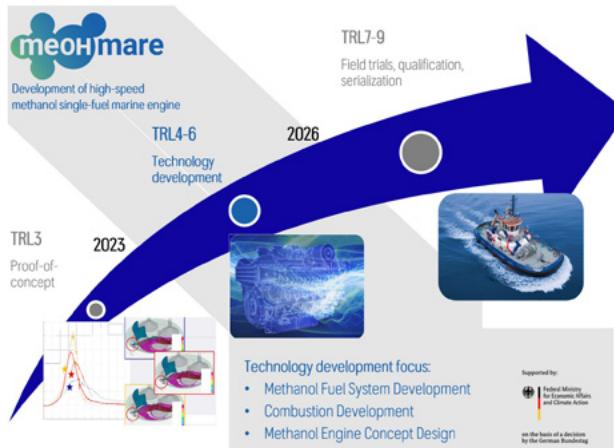


Abb. 1: RRS Technologie-Entwicklungsverlauf des Methanolmotors

Als Kernanforderungen des Projektes gelten:

- CO₂ Einsparung durch Verbrennung von CO₂-neutral hergestelltem (grünem) Methanol
- Motorleistung von 2.000 kW bzw. 125 kW/Zyl. (mit V16-Motor)
- Alleinige Verbrennung von Methanol als „Single-Fuel“ Konzept
- Einhaltung der Abgasgesetzgebung IMO III

Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein Methanol-Motorkonzeptentwurf abgeleitet und mit einem 16V4000 Methanol-Versuchsträger validiert. Im Rahmen des Projekts entwickelt Woodward L'Orange geeignete Methanol-Einspritzkomponenten für die Saugrohreinspritzung und gemeinsam mit der WTZ Roßlau eine neue Methanol-Hochdruckpumpe. Zusätzlich konzentriert sich die WTZ Roßlau auf Materialuntersuchungen und den Aufbau eines Methanol-Komponentenprüfstands für Dauerlaufuntersuchungen.

4. Methanol-Komponentenentwicklung

Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung eines Methanolmotors ist die Verfügbarkeit geeigneter Methanolkomponenten, einschließlich Einspritzdüsen, Kraftstoffleitungen und Hochdruck-Kraftstoffpumpen. Bisher erhältliche Methanol-Injektoren aus dem Motorsport wurden von Benzin-Injektoren abgeleitet und stoßen aufgrund der vergleichsweise geringen Durchflussraten von PKW-Motoren an ihre Grenzen im meOHmare-Konzept. Für den Einsatz in schnelllaufenden Verbrennungsmotoren in einem für die Schifffahrt interessanten Leistungsbereich gibt es noch keine serienreifen Lösungen auf dem Markt, die die Qualitätsanforderungen, insbesondere die Überholungsintervalle (TBO) von Dieselkomponenten, erfüllen.

Für die Entwicklung belastbarer Einspritzkomponenten gelten vor allem Korrosion, als auch Kavitation an kritisch beanspruchten Stellen im Injektor als große Herausforderungen. Kavitation ist temperatur- und druckabhängig, und daher ein Kompromiss zwischen höheren Einspritzdrücken für eine verbesserte Gemischbildung und Druckreduzierung zur Vermeidung von Kavitation. Dies ist für die Entwicklung von Kraftstoffkomponenten von größter Bedeutung und wirkt sich auf das Motorkonzept aus. Weitere kritische Stellen sind Bereiche, die hohen wiederkehrenden Belastungen, ausgesetzt sind, wie z. B. der Nadelsitz, denn hier entsteht in Verbindung mit Methanol aufgrund der Belastung Spannungsrissskorrosion. Durch zusätzliches Vorhandensein von geringen Mengen an Wasser und anderen Verunreinigungen, wie beispielsweise Salz aus der marinen Umgebung kann dieser Effekt beschleunigt werden.

Um die beschriebenen Effekte zu reduzieren, wurden im Rahmen von meOHmare intensive Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die Materialanalysen (statische und dynamische Prüfungen unter Methanol durchgeführt vom WTZ) und numerische Berechnungen (1D-Simulation sowie 3D-CFD) umfassten. Hier zeigt sich besonders, wie die Kompetenzverteilung im Projektverband aus WTZ, Woodward

L'Orange und RRS ineinander greift. Als Ergebnis wurden geeignete Edelstähle, polymer Werkstoffe und optimierte Bauteilkonstruktionen abgeleitet. Verbesserte Einspritzkomponenten werden derzeit auf einem Komponentenprüfstand im Dauerlauf getestet, um die realisierbare Lebensdauer nachzuweisen.

5. Methanol-Verbrennungsentwicklung

Aus den vorangegangenen Untersuchungen wurde das Verbrennungskonzept auf ein fremdgezündetes Otto-Brennverfahren mit äußerer Gemischbildung (PFI) festgelegt. Hierbei wurden die Komponenten für ein Basiskonzept ausgewählt. Um genügend Klopfabstand bei Vollast zu gewährleisten, wurde ein Kolbendesign mit einem Verdichtungsverhältnis von $\varepsilon = 15$ gewählt. Die Festlegung einer geeigneten Einspritzposition erfolgte durch die Kombination aus CFD-Analytik und Tests mit verschiedenen Aufbauten am Einzylindermotor. In Abbildung 2 ist der aktuell verwendete Vollmotoraufbau als Auszug aus dem zugehörigen CAD-Modell dargestellt. Unterstützend erfolgte eine Anpassung des Düsenkappendesigns auf die Einspritzposition durch CFD-Analytik.

Im Hauptfokus der Versuche standen an erster Stelle die Untersuchung eines geeigneten Einspritzsetups. Hierbei zeigte sich, dass eine angepasste Strahlausrichtung im Zusammenspiel mit der Einbauposition des Injektors, Auswahl des Systemdrucks und einem geeigneten Durchfluss, entscheidend für die Qualität der Verbrennung ist. Die Reduzierung von HC-Emissionen gilt in diesem Zusammenhang als ein wesentliches Qualitätskriterium. Hier sollen über den gesamten E3-Zyklus die Zielwerte von $HC = 5\text{g/kWh}$ bei einer Verbrennungsstabilität, gemessen in PMI_COV, von 1.5 % nicht überschritten werden.

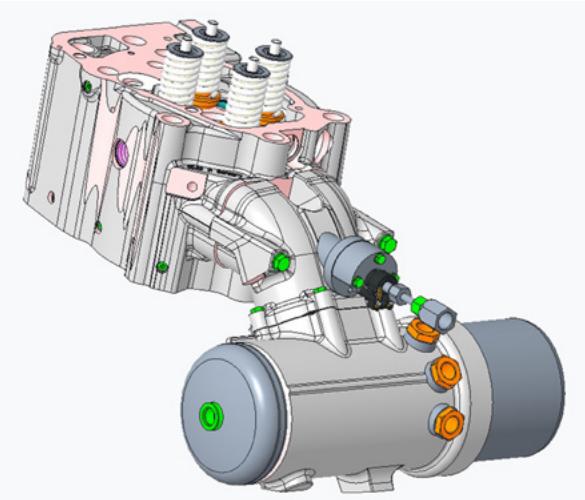


Abb. 2: CAD-Darstellung des Methanol-Einzyylinder Aufbaus

Durch die Optimierung der an der Verbrennung beteiligten Komponenten konnte das Laufverhalten am Einzyylinder deutlich verbessert werden. Abbildung 3 zeigt, wie hoch das Potential ist, was durch die iterativen Optimierungen zu heben ist. So konnte bereits durch die parallel zum Vollmotoraufbau laufenden Weiterentwicklungen am Einzyylinder, die Zyklusschwankungen zwischen den gezeigten zwei Messpunkten deutlich reduziert werden (blau Kurve). Dies führt zum einen zu einem geringeren Niveau des PMI_COV und zum anderen, bei frühen Einspritzzeitpunkten, zu einem gleichzeitig geringeren HC-Emissionsniveau.

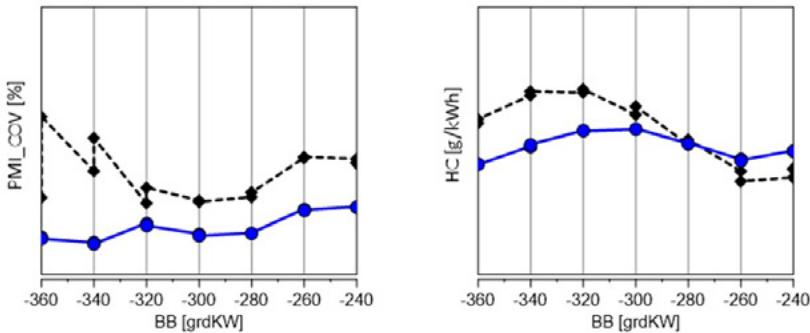


Abb. 3: SOI-Vergleich von COV und HC durch Bauteiloptimierung

Die oben dargestellten Ergebnisse zeigen ein deutliches Optimierungspotential hinsichtlich des ersten Aufbaus des Vollmotorversuchsträgers (schwarz gestrichelte Kurve). Um diese weiter zu optimieren sind fortlaufende Versuche erforderlich. Dazu wird mit analytischer Unterstützung eine Düsenmatrix aufgezogen, um den Einfluss der Strahlausrichtung weiter zu untersuchen und hinsichtlich Vermeidung von Wandfilmbildung zur HC-Reduktion optimiert. Unter Zuhilfenahme von CFD kann so in iterativen Validierungsschleifen das Zusammenspiel aus Gemischaufbereitung und Verbrennung untersucht werden.

6. Methanol- Motorkonzept

Basierend auf den Ergebnissen der zuvor beschriebenen Methanol-Verbrennungsentwicklung wurde ein Motorenkonzept für einen 16-Zylinder-Methanolmotor mit 2.000 kW abgeleitet. Für das Motorenkonzept wurden die Anforderungen für den Einsatz in einem typischen Hafenschleppereinsatz berücksichtigt. Dies umfasst sowohl die betrieblichen Anforderungen als auch die Erfüllung regulatorischer Aspekte, die für den Einsatz von Kraftstoffen mit niedrigem Flammpunkt an Bord eines Schiffes relevant sind. Basis für das Motorenkonzept, das in Abbildung 4 skizziert ist, ist die neueste Entwicklungsstufe des Marinemotors 16V4000M65.

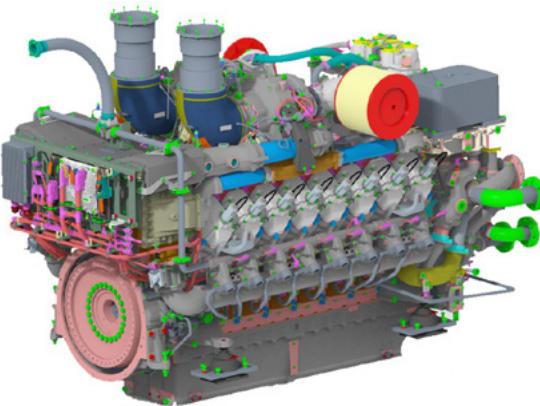


Abb. 4: 16V4000 Methanol-Marinemotor

Die Motorbasis (Kurbelgehäuse und Kurbeltrieb) wurde von der bestehenden Motorplattform „Green Ocean“ übernommen, jedoch mit Modifikationen in Bezug auf die Eigenschaften einer ottomotorischen Verbrennung. Das Verdichtungsverhältnis wurde im Vergleich zum üblichen Dieselmotor reduziert. Eine mögliche Leistungssteigerung mit einer erhöhten Drehzahl auf 2.000 U/min wurde bereits bei der Dimensionierung und Auslegung der Kurbeltriebkomponenten berücksichtigt. Die Aufladung des Motors erfolgt mittels einstufiger Bi-Turboaufladung aus der mtu ZR3-Serie. Der Ladeluftdruck wird durch Zusammenspiel aus Wastegate, Drosselklappen und einem Verdichter-Bypass geregelt.

Für das Methanol-Kraftstoffsystem ist ein völlig neues Design erforderlich, um die von den Klassegesellschaften festgelegten Regeln und ihre vorläufigen Richtlinien für Schiffe mit Alkohol-Kraftstoffen mit niedrigem Flammpunkt zu erfüllen. Das Methanol wird mit einer doppelwandigen Rohrleitung (mit Belüftung des Raums zwischen den beiden Wandungen) zu den Injektoren geleitet. Die vom Projekt-partner Woodward L'Orange entwickelten Injektoren sind in einem belüfteten Gehäuse entlang der Ladeluftleitung vor jedem Zylinder eingebaut.

Die Motorlast wird quantitativ über die Regelung der Luftmasse mittels Drosselklappen geregelt. Dies geschieht über eine für den Methanol-Motor neu entwickelte Motorsoftware. Um eine stabile Verbrennung zu gewährleisten und um Klopfen zu vermeiden, wird die Kraftstoffmasse für jeden Zylinder individuell berechnet und eingespritzt. Zusätzlich wird so innermotorisch die Stickoxidemission auf weniger als 2 g/kWh reguliert. Die Erkennung einer klopfenden Verbrennung erfolgt mittels Klopfsensoren und eines eigens entwickelten Klopfkennungsmoduls. Der Klopfkennungsalgorithmus berücksichtigt methanolspezifische Verbrennungseigenschaften. Diese Informationen ermöglichen es der Motorsoftware auf Klopfen entsprechend zu reagieren und einen stabilen Motorlauf zu gewährleisten.

In Bezug auf die Emissionsanforderungen ist das Projektziel IMO-III-NO_x-Grenzwerte zu erreichen, ohne dass ein SCR-Katalysator benötigt wird. Die Ergebnisse des Einzylindermotors haben gezeigt, dass die Emissionen unter dem Grenzwert von 2 g/kWh gehalten werden können, so dass keine SCR erforderlich sein muss, was wertvollen Platz im Maschinenraum spart. Obwohl die Kohlenwasserstoffemissionen wie beispielsweise CO, HC oder Formaldehyd nicht den IMO-Vorschriften unterliegen, wird es dennoch für notwendig gehalten, diese Emissionen zu verringern. Daher wird der Motor mit einem Oxidationskatalysator ausgestattet. Ein entsprechender Katalysator ist im Vergleich zu einer SCR in Volumen und Gewicht deutlich kleiner, macht das Mitführen von HWL überflüssig und erfordert keine aktive Dosierung oder Steuerung.

Ein wichtiger Aspekt der Motorenauslegung ist das Sicherheitskonzept, für das RRS im Dialog mit den Klassifikationsgesellschaften steht. Das Sicherheitskonzept zielt darauf ab, die Anforderungen an einen gassicheren Maschinenraum zu erfüllen. Dazu gehört neben den bereits erwähnten belüfteten, doppelwandigen Kraftstoffleitungen auch die Kraftstoffversorgung mittels eines sogenannten „Methanol-Pump-Skids“, das im Rahmen des Projekts entwickelt wurde. Dieses enthält die Hochdruck-Kraftstoffpumpe, ein „Doubleblock and Bleed“-Ventil sowie zusätzliche Anschlüsse zum Spülen des

gesamten Kraftstoffsystems mit Wasser oder Stickstoff. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, dass alle Teile von Methanol befreit werden können, um einen sicheren Wartungsbetrieb zu gewährleisten. Alternativ prüft RRS ein Konzept mit inertisierten Gehäusen als Lösung für sichere Kraftstoffleitungen.

7. Motor-Versuch

Da es sich bei meOHmare um das erste Projekt mit Methanol-Vollmotorversuchen am Standort Friedrichshafen handelt, ist zur Durchführung zunächst der Aufbau einer Infrastruktur zur Versorgung der Motorenprüfstände mit Methanolkraftstoff erforderlich. Dazu wurden in der bestehenden Tankanlage zwei Sonderkraftstoff-Tanks technisch auf die Lagerung von Methanol angepasst. Die tankseitig erforderlichen Änderungen umfassen eine Erneuerung der Innenbeschichtung, der Neuaufbau des gesamten Kraftstoffrohrleitungs- und -pumpensystems aus methanolbeständigen Werkstoffen, sowie die Installation entsprechender Sicherheitstechnik zur Überwachung der Anlage auf austretendes Methanol bzw. Methanoldampf. Des Weiteren wurde ebenso die Prüfzelle um entsprechende Sicherheitstechnik (Brandschutz, Explosionsschutz und Umweltschutz) erweitert, was u. a. den Aufbau eines Sicherheits-Methanolauffangbehälters, eines ATEX-Abluftsystems und die Installation eines entsprechenden Belüftungs- und Gaswarnsystems umfasst. Zur Gewährleistung von konstantem Kraftstoffversorgungsdruck und -temperatur wurde ein spezielles Konditioniermodul aufgebaut, welches auch über vollautomatisierte Funktionen zum Befüllen, Entleeren und Spülen der Anlage, sowie eine Funktion zur Kraftstoffprobenentnahme verfügt.

Bei der Planung der Testumfänge wird eine anforderungs- und erfahrungsbasierte Methodik angewandt, bei welcher Tests aus den projektspezifischen Anforderungen (siehe „V-Modell“, VDI Richtline 2206), sowie einem erfahrungsbasierten Prüfkatalog in einer gemeinsamen Testsuite kombiniert werden. Als Planungs-, Organisations- und Trackingwerkzeug wird hierzu die PLM-Software Windchill RV&S

eingesetzt. Entsprechend der jeweiligen Testcharakteristik (Voraussetzungen, Anforderungen, Ziele) können anschließend alle Tests einer jeweils passenden Prüfumgebung (z. B. Komponentenprüfstand, Virtueller Prüfstand, Vollmotorenprüfstand, etc.) zugeordnet werden.

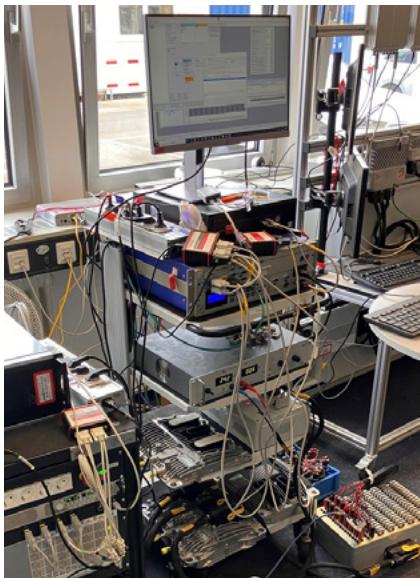


Abb. 5: HIL-Prüfstand mit Simulator und ECU

Um die Funktionen der neu entwickelten Motorsteuergeräte-Software auf Funktionsfähigkeit prüfen zu können, wurde parallel ein „Hardware-in-the-Loop“ (HIL) - Prüfstand aufgebaut. Die Kernkomponente des Prüfstands stellt der HIL-Simulator dar, an welchen die ECU über ihre Ein- & Ausgänge angeschlossen wird. In Kombination mit einer Restbus-Simulation zur Nachbildung des übrigen Steuergeräteverbunds wird so das gesamte reale Motorsystem nachbildet. Dies ermöglicht das Testen und Absichern der ECU-Funktionssoftware auf der Zielhardware bereits in der Früh-Phase ihrer Entwicklung, während der Real-Motor und -Prüfstand noch nicht verfügbar sind.

Die messtechnischen Verfahren und Methoden zur Bestimmung der Emissionen, sowie zur Erfassung spezifischer motorischer Parameter (z. B. Klopferkennung) wurden während der Phase der Verbrennungsentwicklung validiert und konnten so entsprechend für den Vollmotorenversuchsaufbau übernommen werden.

Nach erfolgreichem Aufbau der Kraftstoff- und Prüfstands-Infrastruktur, Vorbereitung des Methanol-Pump-Skits sowie dem Aufbau des 16V4000 MeOHmare-Versuchsmotors und des Abgasnachbehandlungssystems konnte der Versuchsaufbau am Prüfstand umgesetzt werden.

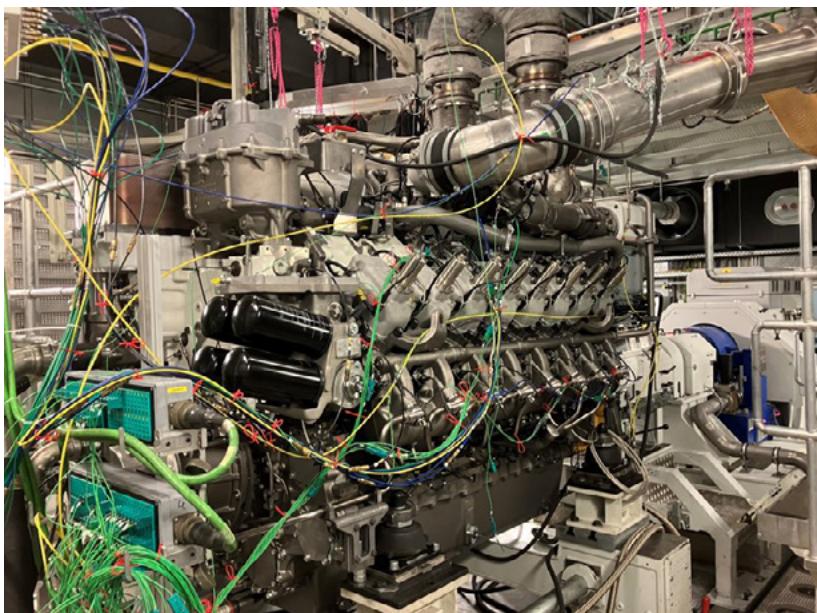


Abb. 6: 16V4000 Methanolmotor auf dem Vollmotoren-Prüfstand

Der erste Schritt der Inbetriebnahme umfasst die Kalibrierung und Prüfung aller anlagenseitigen, als auch motorregelungsseitigen Sicherheitsfunktionen, um unsichere Systemzustände und Fehlfunktionen zuverlässig erkennen und abfangen zu können. Der zweite Schritt umfasst die Implementierung des Start- und Stoppablaufs,

sowie die Abstimmung der zentralen Motorsteuerungs- und Regelungsfunktionen. Dazu wird die am HIL erarbeitete Grundbedatung am realen Prüfstand kalibriert und justiert, bevor mit der Funktionsfeinabstimmung fortgefahren wird. Zum gegenwärtigen Projektstand kann der Motor im gesamten relevanten Kennfeldbereich eines Marinemotors auf dem Prüfstand uneingeschränkt betrieben werden. Hierbei erreicht der Versuchsmotor bei 1800 U/min und einem effektiven Mitteldruck von 17,5 bar seine Nennleistung von 2000 kW. Weiterführend werden nun die in RV&S systematisch angelegten Aufgaben bearbeitet, bis die experimentellen Projektumfänge planmäßig mit der Befundung des Motors im Frühjahr 2026 zur Klärung wichtiger Fragestellungen hinsichtlich Haltbarkeit aller Komponenten (mechanisch, thermisch und deren chemischen bzw. korrosiven Beständigkeit gegen die Einwirkung von Methanol) finalisiert werden.

8. Ausblick

Im Projekt meOHmare zeigen WTZ, Woodward L'Orange und RRS, dass Methanol als Kraftstoff eine gute Basis bietet, CO₂-neutrale Marinemotoren zu entwickeln. Das Projekt zeigt auch, dass der Single-Fuel Methanolmotor in seiner Leistungsdichte eine Alternative zu konventionellen Dieselmotoren darstellt. Weiterhin wird deutlich, dass gerade im Bereich der Einspritzung und Gemischaufbereitung noch Entwicklungspotential steckt. Gerade die Langlebigkeit der Komponenten stehen bei einer solchen Weiterentwicklung im Vordergrund.

Es ist davon auszugehen, dass Methanol eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung der Schifffahrt spielen wird. Wenn die Infrastruktur für Methanol fortlaufend ausgebaut wird, um auch an weniger frequentieren Orten genügend Methanolkraftstoff bereitzustellen, bietet sich der Methanolmotor als idealer Antrieb im Bereich der Hafenschlepper, Fähren und Arbeitsschiffen an. Das Projekt meOHmare kann bei diesem Weg als wichtiger Meilenstein angesehen werden. Die Verbrennung von Methanol in einem Vollmotorkonzept

ist im Projektverlauf Realität geworden und legt somit die Basis für weitere Technologieentwicklungen hin zu klimaneutralen Antrieben in der Schifffahrt.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt hier dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, das im Rahmen der Förderung des Maritimen Forschungsprogramms die Fördermittel für das Projekt meOHmare bereitgestellt hat. Ebenso gilt unser Dank dem Projektträger Jülich für die Begleitung und Unterstützung über das gesamte Fördervorhaben hinweg.

Literatur

[1] International Maritime Organization, 2023. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships [aufgerufen am 15. September 2025].
Quelle: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>

[2] BERGMAN, J., 2023. EU Parliament approves shipping's inclusion in regional emissions trading. 20 April 2023 [aufgerufen am 15. September 2025].
Quelle: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/eu-parliament-approves-shippings-inclusion-in-regional-emissions-trading-75867>

03SX444

FWIGREM

Simultane Inversion von seismischen Wellenformen, Elektromagnetik und Gravimetrie

Verfahren zur konsistenten Optimierung eines geologischen Multi-Parametermodells für die umweltschonende Erkundung des marinen Untergrunds

Autorenliste

TERRASYS Geophysics GmbH & Co. KG

Markus Krieger

Venke Becker

Christina Müller

Dr. Peter L. Smilde

TEEC GmbH

Dr. Gerald Klein

TEECware GmbH

Eliakim Schünemann



1. Einleitung: Motivation, Hintergrund und Konzept

Die genaue Erkundung des Meeresbodens und insbesondere seines Untergrundes stellt immer noch eine große Herausforderung dar. Mittels geophysikalischer Verfahren lassen sich in umweltschonender Weise die Struktur und Zusammensetzung des Gesteins unter dem Meer bis in große Tiefen untersuchen; dabei spielen drei geophysikalische Materialeigenschaften eine wichtige Rolle: die seismische Geschwindigkeit, die elektrische Leitfähigkeit und die Dichte des Gesteins. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse, z. B. über die Porosität oder Permeabilität, und digitalen geologischen Modelle können Antworten liefern für multidisziplinäre Anforderungen im maritimen Bereich. Diese reichen von Stabilitätsuntersuchungen des Meeresbodens (z. B. für Offshore-Windparks) oder Rutschungsstudien in Schelfbereichen über die Detektion von Gashydraten bis hin zur Exploration von Öl und Gas oder von geeigneten CO₂- , H₂- oder geothermischen Speichermöglichkeiten. Des Weiteren gibt es vielfältige Anwendungen im terrestrischen Bereich, von der Endlagererkundung über Grundwasserfragen bis hin zu archäologischen Fragestellungen, – dies ist ein wichtiger Multiple-Use-Aspekt für die beiden am Projekt beteiligten KMUs TEEC und TERRASYS.

Durch die Kombination mehrerer geophysikalischer Verfahren, zuerst in einer iterativen Inversion der Einzelverfahren (Seismik, Elektromagnetik und Gravimetrie) und dann in einer simultanen gemeinsamen Optimierung („Joint Inversion“, „JI“), können vollständigere Parametermodelle der physikalischen Eigenschaften des Erdinneren generiert werden als durch die jeweiligen Verfahren einzeln, was einen wesentlichen Fortschritt im Rahmen der JI-Entwicklung darstellt.

Für detailliert aufgelöste Parametermodelle des Gesteins ist eine Verfahrenskombination der hochauflösenden seismischen Wellenforminversion („Full Waveform Inversion“, „FWI“) zusammen mit der Inversion von elektromagnetischen Daten aus kontrollierten Quellen („Controlled Source ElectroMagnetics“, „CSEM“ oder „EM“) und der Inversion gravimetrischer Daten aus mehreren Gründen sinnvoll:

1. Alle drei Einzelmethoden sind aufgrund von möglichen Mehrdeutigkeiten auf zusätzliche Informationen (z. B. Geologie, Sedimentologie) angewiesen. Daher beschränkt eine simultane Modelloptimierung den Lösungsraum auf gemeinsam „erlaubte“ Lösungen, was den Inversionsprozess stabilisiert und den Realitätsbezug erhöht.
2. Trotz der rasanten Entwicklung der FWI-Technologie besteht für eine stabile Anwendung der Methode eine wesentliche Herausforderung in der Erzeugung geeigneter Startmodelle, die vor allem realitätsnahe langwellige bzw. großräumige Variationen der Geschwindigkeit enthalten müssen. Eine weitere Stabilisierung kann durch Beiträge anderer geophysikalischer Verfahren erreicht werden.
3. Die Erzeugung vorab optimierter Startmodelle wird durch die Gesamtbetrachtung der verschiedenen Datentypen verbessert; so werden für die FWI andere Methoden, insbesondere Gravimetrie und Elektromagnetik (EM), vor oder zu Beginn der gemeinsamen Inversion in die Modellentwicklung einbezogen. Umgekehrt brauchen diese Verfahren ebenfalls geeignete Startmodelle, die auf Basis der seismischen Daten aufgebaut werden können.
4. Die drei geophysikalischen Methoden eignen sich gut für eine simultane Optimierung, da sich einerseits die Größenordnungen ihrer räumlichen Auflösungsvermögen unterscheiden (und die Methoden sich somit ergänzen) und sich andererseits die Auflösungsbereiche von FWI und EM sowie von EM und Gravimetrie jeweils überlappen, sodass eine gemeinsame Inversion Parametermodelle so abgleichen kann, dass die jeweiligen Beobachtungsdaten bestmöglich erklärt werden.
5. Ein modularer und für externe Einzelinversionen offener Anwendungsrahmen („Joint Inversion Framework“, „JIF“) wird beim Partner TERRASYS für die Integration der FWI des Partners TEEC zur Verfügung gestellt.

Bei der simultanen JI der drei Verfahren handelt es sich um einen bisher konkurrenzlosen Inversionsansatz. Durch die zentralen Entwicklungsarbeiten an der gemeinsamen Inversion konnten folgende Fortschritte realisiert werden:

1. Qualitätsverbesserung der Multi-Parameter-Inversion durch Hinzunahme weiterer Methoden, hier der seismischen FWI.
2. Verringerung von Mehrdeutigkeiten des Lösungsraums durch stärkere Überlappung der Auflösungsbereiche.
3. Erhöhte Einheitlichkeit der Modelle durch Kopplungsstrategien für petrophysikalische Parameterbestimmungen.
4. Stabilere Anwendung in einem erweiterten Datenbereich durch verbesserte Algorithmen, hier durch die sogenannte „Cycle-Skipping-Mitigation“ in der FWI.

Bisher arbeiten die meisten FWI- und auch EM-Inversionen auf rein voxelbasierten Modellen, was inversionstechnisch gesehen einige Vorteile bietet, aber die geologische Interpretation der Ergebnisse und deren Anwendungen nicht weiter unterstützt. Der Inversionsablauf bei TERRASYS beruht auf einem Strukturmodell, das geologische Körper mit ihren klar definierten Kanten modellieren kann. Solche strukturellen Modelle bewirken über die gemeinsame geologischen Einheiten in einer Joint Inversion eine direkte Kopplung der geophysikalischen Methoden in einem Modell, das zudem einfacher zu interpretieren ist.

Die Methode der FWI ist für die Anwendung im maritimen Bereich im Besonderen geeignet, da hier die seismische Datenqualität und -dichte wesentlich besser und aus physikalischen Gründen die Näherung einer akustischen Wellengleichung praktikabler ist als bei Landdaten. Unternehmen der Rohstoffindustrie setzen die Methode der akustischen FWI zunehmend für die Exploration in maritimen Gebieten ein. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Bohrkosten – insbesondere im Tiefwasserbereich – sehr hoch sind und

somit das aus der geophysikalischen Interpretation gewonnene Modell möglichst präzise sein muss, um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Exploration in immer komplexeren Gebieten verlangt daher geophysikalische Datenbearbeitungen nach besten Standards.

An einem realen Datensatz aus der Industrie wird der innerhalb dieses Projekts entwickelte Workflow zur Durchführung einer Joint Inversion angewendet. Die Firma Equinor (Norwegen) hat dafür geophysikalische Daten aus der Barentssee zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden werden die Methodik und die Arbeitsabläufe etwas detaillierter beschrieben und Ergebnisse anhand von drei anwendungstypischen Beispielen demonstriert.

2. Die Methode der strukturellen Joint Inversion

Da viele geowissenschaftliche Anwendungen von der Kenntnis der Verteilung spezifischer Gesteinseigenschaften, wie z. B. Porosität und Permeabilität, abhängen, können diese über empirische Beziehungen mit der elektrischen Leitfähigkeit, der Dichte und der Impedanz (Produkt aus Dichte und Wellengeschwindigkeit) verknüpft werden, die aus elektromagnetischen, gravimetrischen und seismischen Messungen gewonnen werden. Abb. 1 zeigt beispielhaft derartige multi-physikalischen JI-Daten und Ergebnisse aus dem Untersuchungsgebiet in der Barentssee (Modellabmessungen: ca. 31 km x 27 km x 5 km).

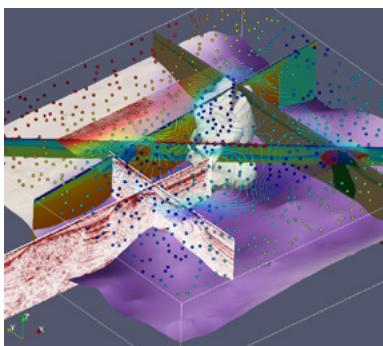


Abb. 1: Typisches 3D-Modell mit Daten (Seismik, EM, Gravimetrie), geologischem Horizont und Salzstruktur

Die FWI hat zu bedeutenden Fortschritten bei der Auflösung komplexer Untergrundmodelle geführt, die aus gemessenen Felddaten abgeleitet wurden, während die Gravimetrie, Magnetik und EM wertvolle zusätzliche unabhängige Informationen beitragen, die die Stabilität, Zuverlässigkeit und Auflösung seismischer Methoden im Allgemeinen und hier insbesondere der FWI weiter verbessern können.

Das in dieser Studie verwendete Joint Inversion Framework (JIF) zeichnet sich durch eine geometrisch einheitliche Parametrisierung des Strukturmodells aus, das in Abb. 2 im Zentrum steht. Es verbessert die Ähnlichkeit der invertierten räumlichen Verteilung der entscheidenden Strukturen für alle verwendeten Datensätze [1].

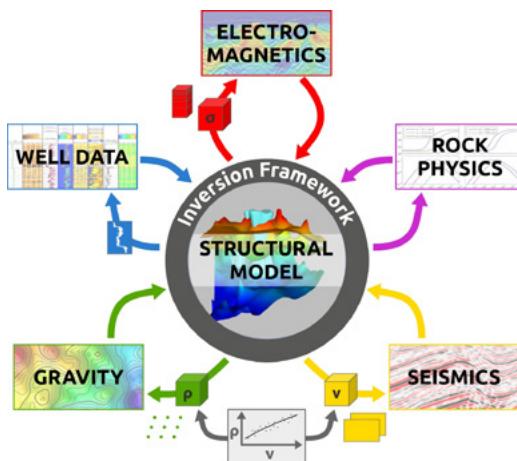


Abb. 2: Das geologische Strukturmodell im Zentrum einer gemeinsamen Multi-Parameter-Optimierung (JIF)

Die beiden wichtigen Vorteile der strukturellen Inversion gegenüber der reinen Voxel-Inversion sind:

- weniger Inversionsparameter aufgrund der Reduzierung auf diejenigen, die relevant oder notwendig sind, um plausible Strukturmodelle zu beschreiben, und

- inhärente geologisch bedingte Modellaktualisierungen, da die Parametrisierung das Inversionsergebnis näher an das geologische a-priori-Wissen heranführt.

Abb. 2 zeigt das modulare Konzept des JIF, das verteilte Vorwärtsberechnungen ermöglicht, die optional von Expertenteams auf ihren eigenen Systemen durchgeführt werden können.

Die größten Herausforderungen einer Joint Inversion sind

- die Gewichtung der Fehlanpassungen verschiedener Methoden mit unterschiedlichen Einheiten und
- die Sicherstellung der Konvergenz der Inversion.

Die erste Herausforderung wird durch die Verwendung von physikalisch aussagekräftigen Standardabweichungen gelöst, mit denen die Fehlanpassungen implizit gewichtet werden, die zweite durch einen Arbeitsablauf mit sukzessiven Optimierungen in mehreren Inversionsstufen:

- Ein stufenweiser Arbeitsablauf wird bei Potenzialfeldmethoden wie der Gravimetrie selten verwendet, obwohl er vorteilhaft ist, z. B. bei der Geokörperinversion (siehe Kap. 6).
- Die FWI benötigt ein Modell, das der tatsächlichen Situation nahe genug kommt, um sogen. Zyklussprünge („Cycle Skipping“) zu vermeiden, die das Ergebnis komplett unbrauchbar machen können. Der stufenweise strukturelle FWI-Ansatz ist in der Lage, die Lösung in die Nähe der tatsächlichen Modellparameter zu bringen (siehe Kap. 7).
- Mehrere aufeinanderfolgende Stufen in einem JI-Workflow, der Gravimetrie, Elektromagnetik und Seismik von langen zu kurzen Wellenlängen kombiniert, führen zur Einbeziehung detaillierterer geologischer Merkmale und zuverlässigerer Ergebnisse (siehe Kap. 8).

3. Das Joint Inversion Framework (JIF)

Eine etwas detailliertere Darstellung der Funktionsweise der verwendeten Rahmenanwendung (JIF) ist in Abb. 3 zu sehen, in der die gemeinsame Inversion von FWI- (gelb), Gravimetrie- (grün) und EM- (rot) Daten zur kollaborativen Optimierung eines strukturellen geologischen Modells gezeigt ist. Dabei werden die Änderungen (Gradienten) der jeweils zur Vorwärtsberechnung verwendeten Voxel-Geometrien und Gesteinseigenschaften in Änderungen des gemeinsamen Strukturmodells transformiert, das für die nächste Iteration wiederum in Voxel-Darstellungen re-transformiert wird.

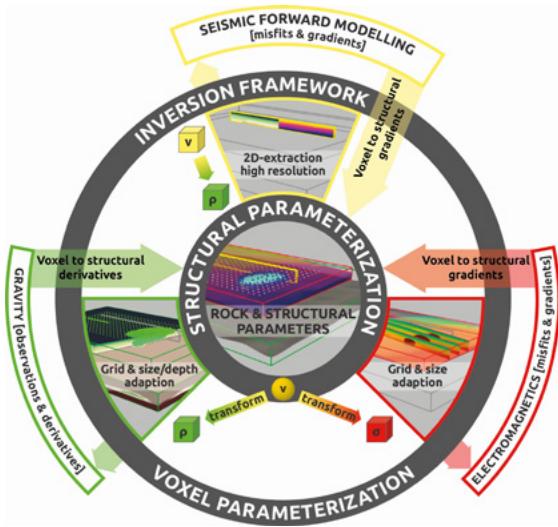


Abb. 3: Die Funktionsweise des Joint Inversion Frameworks (JIF)

Die Vorwärts- und Gradienten-Berechnungen können mit der entsprechenden Software auch aus der Ferne durchgeführt werden, was bei größeren Projekten eine flexible Zusammenarbeit verschiedener Partner ermöglicht, ohne dass diese ihre jeweiligen Programmcodes offenlegen müssten.

Statistiken zu den Inversionsergebnissen werden durch eine spezielle Realisierung des Variable-Metrik-Algorithmus bereitgestellt, sodass eine Evaluation der Robustheit und Genauigkeit der Lösung stattfinden kann. Dies ist für viele Kunden ein wichtiges Kriterium, da die Zuverlässigkeit der Modelle weitreichende finanzielle Konsequenzen bei der weiteren Projektplanung haben kann.

4. Der Arbeitsablauf im JIF

Die in Kap. 3 beschriebenen Transformationsprozesse sind in Abb. 4 für den Arbeitsablauf innerhalb des JIF noch detaillierter dargestellt. Jede Methode verfügt über eine eigene Vorwärtsberechnung des aktuellen gemeinsamen Modells. Die berechneten Modellabweichungen werden in strukturelle Modellgradienten umgewandelt, die die Inversion zur nächsten Modellaktualisierung leiten.

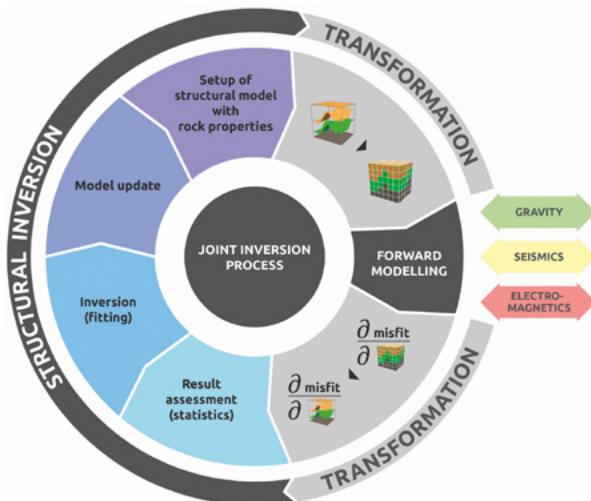


Abb. 4: Die Prozesse im Arbeitsablauf des Joint Inversion Frameworks (JIF)

Modellparameter wie Schnittstellen, Gitterflächen und Geschwindigkeiten sowie Geschwindigkeitsgradienten werden dann in ein Voxel-Modell umgewandelt, das wiederum für die Vorwärtsberechnung

verwendet wird. Die verschiedenen Modelle sind durch die gemeinsame Geometrie der zentralen geologischen Einheiten sowie durch geeignete Gesteinseigenschaften auf der Grundlage von Bohrloch- oder Labordaten und Literaturangaben miteinander verbunden.

5. Das synthetische Modell

Inspiriert durch verfügbare Felddaten aus der Barentssee wurde ein synthetisches 3D-Modell zum Testen der entwickelten Werkzeuge und Arbeitsabläufe erstellt. Die Datenlokationen in Abb. 5 sind in rot (Seismik), orange (Gravimetrie) und rosa (CSEM) dargestellt; für die 2D-FWI wird ein Geschwindigkeitsprofil angezeigt. Die hier gezeigte, auf die Seismik abgestimmte Modellgröße beträgt 34 km x 24 km und reicht von 0 bis 2 km Tiefe in einer flachen Meeresumgebung; die vertikale Überhöhung ist zweifach. Das Modell für die EM ist lateral etwas ausgedehnter, das für die Gravimetrie deutlich, zudem in der Tiefe bis 5 km.

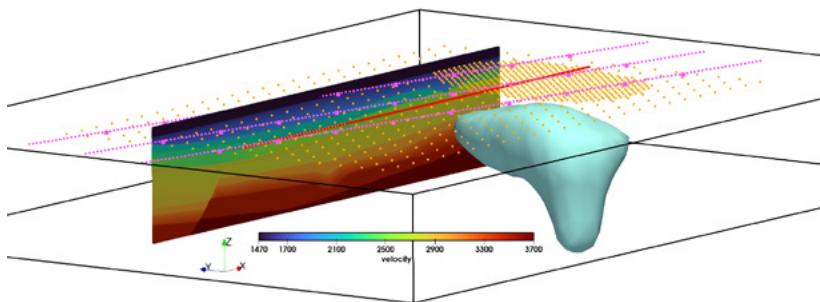


Abb. 5: Komponenten des synthetischen 3D-Modells, mit Daten, Geschwindigkeitsprofil und Salzkörper

Neben 11 Horizonten weist das Modell einen Salzdiapir (cyan), eine normale Verwerfung, eine flache und eine tiefe Rinne sowie eine auskeilende Schicht auf. Die seismischen Geschwindigkeiten werden anhand von Mittelwerten, vertikalen Gradienten und lateralen Variationen durch Kontrollpunkte für jede geologische Einheit zugewiesen. Dichten und Widerstände werden vorwiegend über

schichtspezifische, sorgfältig angepasste empirische Beziehungen mit den Geschwindigkeiten verknüpft.

Die CSEM-Daten decken das Salz und die Verwerfung mit drei Profilen ab, wobei die Frequenzen 0,25, 1 und 5 Hz modelliert werden; die synthetischen Beispiele werden in 3D mit der Software emg3d [2] berechnet. Die gravimetrischen Daten werden in 3D als grobes Gitter generiert, jedoch mit einer dichten Abtastung oberhalb und neben dem Salzkörper; die seismische FWI wird aus Effizienzgründen in 2D berechnet.

6. Strukturelle JI mit Gravimetrie und EM mit sphärisch-harmonischen Funktionen

In diesem ersten Beispiel ist die Optimierung eines Salzkörpers durch die gemeinsame Inversion von Gravimetrie (G_z und Gradient G_{zz}) und Elektromagnetik (CSEM) dargestellt (Abb. 6), wobei die Verformung der Salzstruktur durch sphärisch-harmonische Funktionen in zwei aufeinanderfolgenden gemeinsamen Inversionsstufen parametrisiert wird.

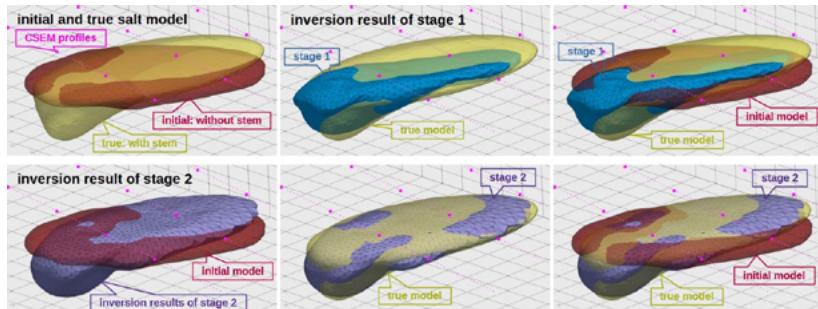


Abb. 6: Geometrische Inversion eines Salzkörpers durch sphärisch-harmonische Funktionen in zwei Phasen

Die Bedeutung der Modellfarben ist wie folgt:

- gelb: das tatsächliche Modell, mit dem die synthetischen Daten berechnet wurden;
- rot: die Form des (deutlich veränderten) Startmodells: die ellipotische Struktur ist rechts abgesenkt und nach vorn verdreht, die Verdickung (Wurzel) links fehlt komplett;
- blau: das Inversionsergebnis der 1. Inversionsstufe (obere Reihe): die Position und das Gesamtvolumen konnten annähernd reproduziert werden, die Neigung und Drehung der Ellipse wurde reduziert und die Wurzel links wurde angelegt;
- violett: das Inversionsergebnis der 2. Inversionsstufe (untere Reihe): die Form, Neigung und Drehung der Ellipse sind recht detailliert wiederhergestellt, ebenso ist der Stiel besser ausgeformt, insgesamt ist das Gesamtvolume sehr gut wiedergegeben.

Salzformationen sind aufgrund ihrer signifikanten Kontraste in Dichte und Leitfähigkeit günstige geologische Strukturen für gravimetrische und elektromagnetische Messungen. Bei begrenzten Kenntnissen über die tatsächliche Salzverteilung sollte zunächst dessen ungefähre Form modelliert werden, bevor weitere Details hinzugefügt werden. Dies ist in diesem Beispiel durch die Verwendung sphärisch-harmonischer Funktionen erfolgt, die es erlauben, den Salzkörper mit nur wenigen Parametern zu verformen. Durch Hinzufügen weiterer sphärisch-harmonischer Parameter höheren Grads und höherer Ordnung können weitere Details in späteren Phasen modelliert werden, z. B. durch EM-Daten höherer Frequenz sowie durch zusätzliche (verdichtete) gravimetrische Messpunkte.

7. Strukturelle FWI

Das in diesem Abschnitt gezeigte Beispiel behandelt die rein seismische FWI, die zum einen strukturell über das JIF durchgeführt wird

und zum anderen – wie üblich – rein voxelbasiert angewendet wird. Gegenüber dem tatsächlichen synthetischen Modell sind hier die Geschwindigkeiten im oberen Teil des Startmodell um etwa 10 % erhöht. Ferner wird die Tiefe bis zum obersten Horizont entsprechend der erhöhten Geschwindigkeit um bis zu 50 m vergrößert.

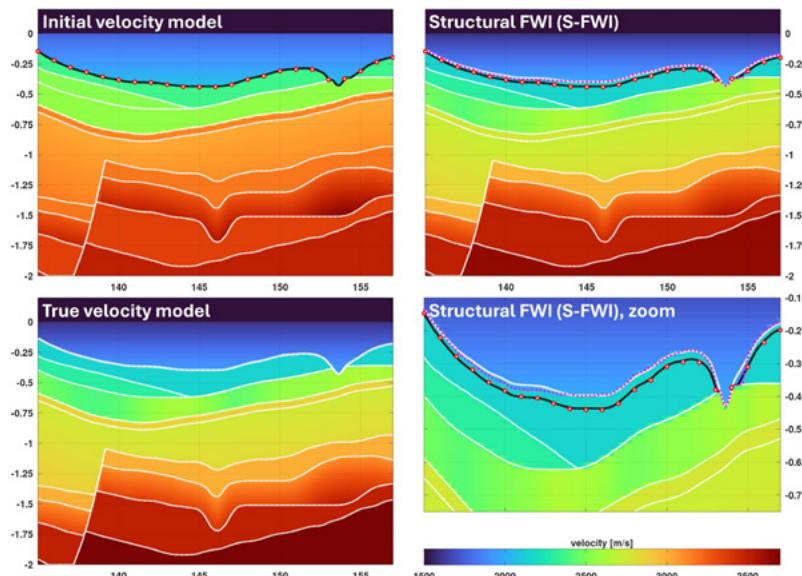


Abb. 7a: Geschwindigkeitsmodelle bei der strukturellen FWI („S-FWI“)

Für die Strukturmodellierung in Abb. 7a, werden Kontrollknoten (rot-weiße Kreise) auf dem modifizierten Horizont (schwarz) platziert, um ihn während der Inversion zu verformen. Die vier Profile zeigen die relevanten Modelle bei der strukturellen FWI („S-FWI“) mit folgenden Abmessungen: Länge 22 km, Tiefe 0 – 2,0 km (Zoom: 0,1 – 0,75 km), vertikale Überhöhung 7,5-fach (Zoom: 20-fach). Dargestellt ist:

- links oben: Start-Geschwindigkeitsmodell mit den beschriebenen Variationen: Schicht-Geschwindigkeiten verändert, schwarzer Horizont modifiziert;

- links unten: Wahres Modell, mit dem die synthetischen Daten berechnet wurden;
- rechts oben: Modellergebnis nach durchgeföhrter S-FWI: reproduzierte Schicht-Geschwindigkeiten (Farben), wiederherstellter Horizont (rosa gepunktet);
- rechts unten: Zoom des obigen Profils nach S-FWI (Horizontanpassung besser erkennbar).

Die wahre Geometrie sowie die Geschwindigkeiten werden in einem mehrstufigen strukturellen Modellierungsansatz, der mit niedrigen Frequenzen des seismischen Signals und kleinen Offsets (zwischen Schuss und Empfänger) beginnt, gut wiederhergestellt. Dies zeigt das Inversionsergebnis (rechts oben) im Vergleich zum Startmodell (links unten) beim Horizont (rosa gepunktet zu weiß) und den Schichtgeschwindigkeiten (farblicher Verlauf übereinstimmend).

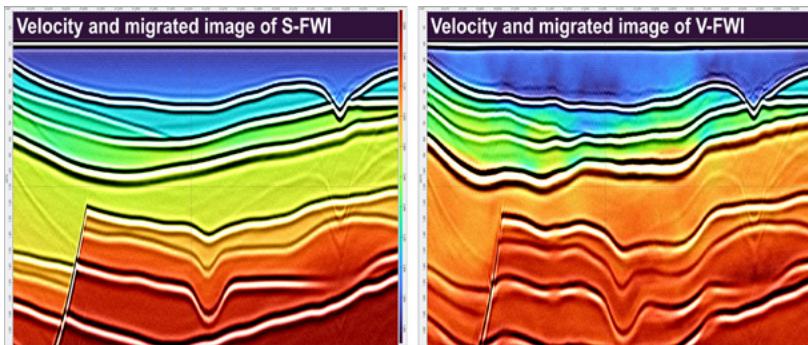


Abb. 7b: Vergleich der Geschwindigkeitsmodelle mit seismischer Sektion für S-FWI (links) und V-FWI (rechts)

Eine andere, aussagekräftige Art der Darstellung ist die Kombination der Geschwindigkeitsmodelle (hier in gleicher Farbskala) mit der in Tiefe migrierten seismischen Sektion, wie in Abb. 7b gezeigt. Das linke Profil stellt das Ergebnis der in Abb. 7a gezeigten S-FWI dar, während das rechte Profil das Resultat einer stabilisierten, zeitversetzten, rein voxelbasierten FWI („V-FWI“) zeigt (nach [3]). Es wird

deutlich, dass die V-FWI aufgrund von Mehrdeutigkeiten durch Cycle Skipping in diesem Fall erhebliche Probleme mit dem Ausgangsmodell hat, was zu falschen Geschwindigkeiten und verzerrten Horizonten führt (rechts). Dem gegenüber passt die S-FWI-Lösung (links) innerhalb des verwendeten Frequenzbereichs gut zum tatsächlichen Modell (Abb. 7a, links unten). Das Strukturmodell mit der S-FWI kann demnach Randbedingungen bieten, um die Schwierigkeiten zu überwinden, die sich aus einem Anfangsmodell ergeben, das sich stark vom tatsächlichen Modell unterscheidet.

8. Strukturelle Joint Inversion mit FWI, Gravimetrie und CSEM

Für das dritte hier gezeigte Beispiel wird nun die strukturelle gemeinsame Inversion („S-JI“) aller drei Verfahren angewendet und das Ergebnis analysiert. Das Startmodell wird hier durch moderate Änderungen der tatsächlichen Wellengeschwindigkeiten – und der entsprechenden Dichten und Leitfähigkeiten durch die Konvertierungsrouterien – sowie durch eine geometrische Verformung der beiden oberen Horizonte in Form einer deutlichen Aufwölbung bzw. Mächtigkeitszunahme gegenüber dem wahren Modell erstellt.

Abb. 8a zeigt die relevanten Modelle (in den Zeilen 1 – 4) und Modellunterschiede (in den Zeilen 5 – 7) für die drei Methoden bzw. Datentypen: Geschwindigkeit (Spalte 1), Dichte (Spalte 2) und (logarithmierte) Leitfähigkeit (Spalte 3); die Profillänge beträgt 22 km, die Tiefe 0 – 1,0 km, und die vertikale Überhöhung ist 7,5-fach.

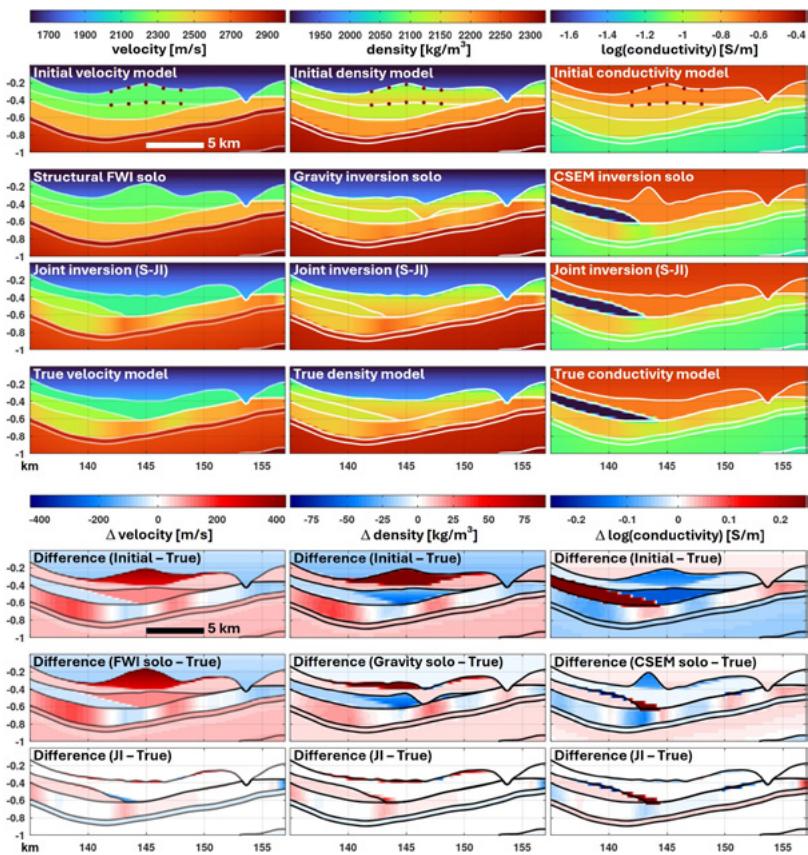


Abb. 8a: Modelle (oben) und Differenzen (unten) für seismische FWI (links), Gravimetrie (m.) und EM (rechts)

Die Startmodelle mit den beschriebenen Änderungen sind in Zeile 1 dargestellt, während ihre Unterschiede zu den tatsächlichen Modellen (Zeile 4) in Zeile 5 mit einer Differenz-Farbskala gezeigt sind, die im ideal angepassten Fall (keine Abweichungen) weiß ist. In Zeile 5 werden natürlich die starken Abweichungen durch die blauen und roten Bereiche deutlich sichtbar.

Zunächst werden methodenspezifische Inversionen („solo“) durchgeführt, um die Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden zu evaluieren; ihre Ergebnisse sind in Zeile 2 und ihre Unterschiede zu den wahren Modellen in Zeile 6 dargestellt. Während geringe Dichte- (Spalte 2) oder Leitfähigkeits- (Spalte 3) Kontraste Unsicherheiten in der Horizontgeometrie an bestimmten Stellen verursachen, sodass sich nur moderate Verbesserungen gegenüber den Startmodell-Differenzen (Zeile 5) ergeben, führt der hohe Geschwindigkeitskontrast (Spalte 1) zwischen Start- und wahren Modell zu zyklischen Sprüngen und damit zu Mehrdeutigkeiten in der eigenständigen strukturellen FWI (S-FWI), sodass – anders als in dem in Kap. 7 gezeigten Fall – hier gar keine Modelloptimierung stattfindet.

Dem gegenüber führt nun die simultane strukturelle Joint Inversion (S-JI) zu signifikant verbesserten Ergebnissen, die in Zeile 3 dargestellt sind, und zwar bei allen drei Methoden. Deutlich wird dies beim Vergleich der Modelle in den Zeilen 3 & 4 und entsprechend bei den jeweils geringen verbleibenden Residuen zu den wahren Modellen in Zeile 7. Dies belegt anschaulich den Mehrwert der im Projekt entwickelten gemeinsamen Optimierung aller Methoden über eine strukturelle Joint Inversion.

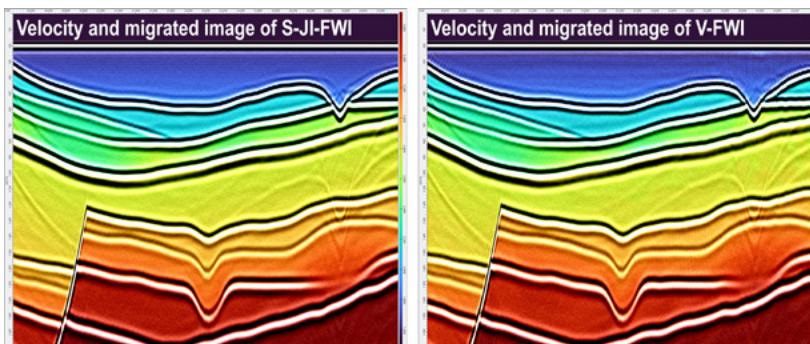


Abb. 8b: Vergleich der Geschwindigkeitsmodelle mit seismischer Sektion für S-JI-FWI (links) und V-FWI (rechts)

Abschließend ist in Abb. 8b der Vergleich des hier bereits in Abb. 8a gezeigten, durch die strukturelle JI optimierten Geschwindigkeitsmodells (S-JI-FWI, mit tiefenmigrierter seismischer Sektion; links) mit dem durch eine rein voxelbasierte FWI (V-FWI) ermittelten Ergebnis (in gleicher Darstellung; rechts) gezeigt: es sind nahezu identische Resultate. Im Vergleich zu den Ergebnissen der V-FWI in Kap. 7 (Abb. 7b, rechts) wird hier deutlich, dass die Qualität der V-FWI auch von den Eigenschaften (und möglichen a-priori-Anpassungen) des ursprünglich zur Verfügung stehenden Geschwindigkeitsmodells abhängt.

9. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Verbundprojekt FWIGREM werden mehrere innovative Ansätze im Arbeitsablauf einer gemeinsamen strukturellen Inversion von seismischer FWI, Gravimetrie und Elektromagnetik implementiert, um für eine zuverlässigere Kartierung des marinen Untergrunds Mehrdeutigkeiten und Freiheitsgrade bei geologischen Modellierungsprozessen zu reduzieren:

- eine geometrische Parametrisierung des Strukturmodells,
- eine intelligente, flexible Kopplung von multi-physikalischen Modellparametern,
- lokale und wellenlängenbasierte Steuerungsmöglichkeiten und
- eine stufenweise Inversionsstrategie mit
- der Einbeziehung multipler Frequenzen und Offsets und
- der Kombination verschiedener Inversionsmethoden in gestaffelten Phasen.

In unseren „Sandbox“-Beispielen zeigen wir anhand eines realistischen synthetischen Modells, dass die strukturelle Parametrisierung des Untergrundmodells für eine gemeinsame Inversion (S-JI) und die darin eingebettete strukturelle FWI (S-FWI) die Freiheitsgrade erheblich reduzieren kann und besser als die voxelbasierte FWI (V-FWI) dazu beitragen kann, das Problem des Cycle Skippings zu überwinden.

Darüber hinaus kann die gemeinsame Inversion mit gravimetrischen und CSEM-Daten die erforderliche zusätzliche Stabilität in den langwelligen Komponenten des Untergrundmodells bieten, um die kontinuierliche Verfeinerung des Modells mit zunehmend höheren Frequenzen der seismischen Wellenform in einem mehrstufigen Ansatz zu ermöglichen.

Auf diese Weise kann ein hochauflösendes Modell bestimmt werden, das möglichst genau mit allen Multi-Parameter-Daten, geologischen Randbedingungen und weiteren a-priori-Informationen sowie bekannten empirischen Beziehungen zwischen den Modelleigenschaften übereinstimmt.

Aus dem Vergleich der einzelnen FWI-, Gravimetrie- und CSEM-Inversionen mit der strukturellen gemeinsamen Inversion aller drei Methoden ist nachweisbar, dass der Inversionsprozess bei Anwendung der mehrstufigen Optimierung stabiler wird und dass die individuellen Mehrdeutigkeiten jeder Methode durch die gemeinsame Optimierung aller Datenquellen stark reduziert werden.

Obwohl alle Berechnungen an einem synthetischen Modell so realistisch wie möglich gestaltet wurden, müssen die hier entwickelten Methoden noch an realen Datensätzen getestet werden, was derzeit geschieht.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Projektträger Jülich für die umfassende Unterstützung und beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projekts. Weiterhin danken wir Dieter Werthmüller und María Corrizo Mascarell für ihre wertvollen Beiträge zur CSEM-Modellierung und -Inversion.

Literatur

- [1] Smilde P. L., C. Mueller, M. H. Krieger, and S. Petersen, 2018, Interpretation Benefits from a Flexible Multi-Physics Joint Inversion Approach: 80th Annual International Conference and Exhibition, EAGE, Extended Abstracts; doi: 10.3997/2214-4609.201801890.
- [2] Werthmüller, D., W. A. Mulder, and E. C. Slob, 2019, emg3d: A multigrid solver for 3D electromagnetic diffusion: Journal of Open Source Software, 4(39), 1463; doi: 10.21105/joss.01463.
- [3] Zhang, Z., J. Mei, F. Lin, R. Huang, and P. Wang, 2018, Correcting for salt misinterpretation with full-waveform inversion, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1143-1147; doi: 10.1190/segam2018-2997711.1.

03SX444

IRAV

Industrielle Räumung von Altlasten in Verklappungsgebieten

Autorenliste

TKMS ATLAS ELEKTRONIK GmbH

Franziska Auer

Dr. Julien Hansen

TKMS GmbH

Martin Rütten

Axel Rasch

STASCHEIT Kampfmittelräumung GmbH

Anja-Sophie Bertschat

Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems IWES

Konstantinos Kostopoulos



1. Einleitung

Das Projekt IRAV (Industrielle Räumung von Altlasten in Verklappungsgebieten) adressiert den essentiellen Bedarf an einer vollständigen Entsorgungskette für verklappte Munitionsaltlasten (UxO), insbesondere die Detektion und Klassifikation der UxO sowie die umweltgerechte Delaboration und Verbrennung von Kampfmitteln aus der See. Im Fokus stehen die kritischen Teilaufgaben der Bergung und der Delaborationskammer selbst, mit dem Ziel, Risiken für nachfolgende Produktentwicklungen zu minimieren und die Realisierung konkreter Bergungs- und Entsorgungsprojekte zu beschleunigen.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeiten ist die hochautomatisierte Detektion und Klassifikation von Munitionsaltlasten, um eine effiziente und sichere Bergung zu gewährleisten. Hierfür wurden in zwei Seever suchen unterschiedliche Sensoren wie Side Scan Sonar (SSS), Synthetic Aperture Sonar (SAS) Sensoren und Magnetometer auf dem SeaCat UUV zur Detektion der UxO getestet. Zusätzlich wurden Transiente Elektromagnetik und seismische Sensoren erprobt. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Mischung dieser unterschiedlichen Sensoren die besten Möglichkeiten zur Detektion, Klassifikation und Bewertung der Altlasten liefert.

Zur Bergung der Altlasten wurde die Entwicklung einer risikoarmen und wirtschaftlichen Bergeplattform vorangetrieben: Die Fundamentierung der Delaborationskammer, um die Auswirkungen von ungewollten Munitionsexplosionen zu begrenzen, sowie der Test eines Remotely Operated Vehicle (ROV) für die Bergung von UxO erfolgten zusätzlich. Ergänzt wurde dies durch Simulationen zur Untersuchung des Einflusses von Wassernebel auf das Detonationsverhalten.

Das Projekt IRAV legt einen idealen Grundstein, um die Räumung von großen Seegebieten mittels hochautomatisierter Systeme und Plattformen, entlang der gesamten Prozesskette von erster Detektion und Klassifikation bis hin zur Bergung und Delaboration, zu industrialisieren.

2. Ausgangssituation zu Projektbeginn

Die heutige Räumung von Munitionsaltlasten in Versenkungsgebieten ist von großer Bedeutung, wird jedoch durch eine Reihe technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Faktoren erschwert. Die aktuelle Vorgehensweise gliedert sich in vier Hauptschritte: Detektion, Klassifikation / Identifikation, Bergung und Entsorgung.

Die Detektion erfolgt flächendeckend mit Sensoren wie Magnetometern und bildgebenden Sonaren, wobei jedoch eine hohe Fehlinterpretationsrate von bis zu 90 % besteht, da Schrott, Stahlseile, Fischernetze und Steine schwer von echten Kampfmitteln zu unterscheiden sind. Dies führt zu einem erheblichen Mehraufwand in den nachfolgenden Prozessschritten. Die Klassifikation und Identifikation potenzieller Altlasten erfolgt derzeit entweder durch Taucher oder mithilfe von ROVs. Taucher versuchen, Anomalien durch Handmagnetometer zu verifizieren und visuell zu bestimmen, während ROVs mit spezieller Sensorik ausgestattet werden, um die Objekte zu lokalisieren und zu identifizieren. Jedoch gestaltet sich eine eindeutige Bestimmung oft schwierig, insbesondere bei ins Sediment eingesunkenen oder versandeten Beständen. Sollte sich die Bergung einer Altlast als notwendig erweisen, werden unterschiedliche Methoden in Betracht gezogen, darunter der Einsatz von Tauchern, Bergegrefern oder ROVs. Während Taucher früher eine größere Rolle spielten, werden sie zunehmend durch ROVs ersetzt, da diese als sicherer gelten. Dennoch ist die Bergung mit hohen Kosten verbunden und erfordert einen erheblichen manuellen Aufwand.

Die Entsorgung der geborgenen Altlasten kann durch spezielle Industrieöfen, Zerlegung oder Sprengung erfolgen. Letztere Methode hat jedoch negative Auswirkungen auf die maritime Umwelt und sollte daher vermieden werden. Insgesamt ist die aktuelle Situation durch eine begrenzte Effizienz, hohe Kosten, Identifizierungsprobleme und mangelnde zufriedenstellende Lösungen für die großflächige Detektion, Klassifikation, Bergung und Entsorgung von Altlasten gekennzeichnet. Insbesondere für versunkene und versandete Bestände besteht ein dringender Bedarf

an neuen Technologien und innovativen Verfahren, um eine wirtschaftlich sinnvolle und umweltschonende Räumung zu gewährleisten. Die Kosten für die Räumung eines einzelnen Fundes können im Bereich von hunderttausend Euro liegen, wie das Beispiel des Offshore-Windparks Riffgat mit Kosten von ca. 57 Mio. Euro für eine Fläche von 6 km² verdeutlicht (vgl. Erneuerbare Energien (20.02.2014)). Daher ist die Entwicklung effizienterer und kosten-günstigerer Verfahren von entscheidender Bedeutung für den Erfolg dieses Projekts.

3. Ziele

Das IRAV-Projekt verfolgte das Ziel, die Voraussetzungen für eine effiziente und sichere Räumung von Munitionsverklappungsgebieten zu schaffen und eine vollständige Entsorgungskette zu etablieren. Dabei stand die Kartierung, Bergung und sichere Demontage von Altlasten im Fokus. Im Laufe des Projekts konnten signifikante Fortschritte bei der Erreichung dieser Ziele erzielt werden. Ein zentraler Erfolgsfaktor war die Implementierung eines hochautomatisierten Systems zur großflächigen Datenerfassung. Der Einsatz von modernen AUVs des Typs SeaCat ermöglichte die präzise und synchronisierte Erfassung von Daten verschiedener Sensortypen, wodurch eine umfassende Kartierung des Munitionsverklappungsgebiets Kolberger Heide realisiert werden konnte. Für die weitere Auswertung dieser Daten wurde ein grundlegendes Framework entwickelt, welches in nachfolgenden Projekten zur Implementierung automatisierter Prozesse mittels maschineller Lernverfahren weiterentwickelt werden soll.

Ein hochauflösendes, robustes seismisches System zur Detektion und präzisen Charakterisierung von Altlasten in marinen Versenkungsgebieten bis zu 10m Wassertiefe wurde entwickelt. Durch detaillierte numerische Modellierung und Simulation wurde ein optimales Systemdesign erarbeitet, das eine hohe Detektionswahrscheinlichkeit unter verschiedenen Sedimentbedingungen gewährleistet. Ein besonderer Fokus lag auf der Anpassung bestehender

Detektionsalgorithmen an höhere Frequenzen und variierende Objekteigenschaften, um die Detektionsleistung zu verbessern und eine anschließende Objektspezifizierung zu ermöglichen. Das Systemdesign umfasst integrierte hochpräzise Positionierungs-lösungen (GPS, USBL, MRU/INS) zur genauen räumlichen Referen-zierung unter realistischen Seebedingungen. Um eine verbesserte Auflösung und flächenhafte Erfassung zu erreichen, wurde das System zusätzlich für den Einsatz auf ferngesteuerten geschleppten Unterwasserfahrzeugen (Remotely Operated Towed Vehicle, ROTV) ausgelegt. Abschließend wurden fortgeschrittene Datenauswertes-trategien entwickelt, um eine präzise physikalische Charakterisie-rung vermessener Objekte zu gewährleisten und so einen direkten und möglichst echtzeitnahen Support für industrielle Räumungs-einsätze zu ermöglichen.

Im Rahmen der Elektromagnetische Klassifikation wurde ein modu-larer Demonstrator auf Basis der transienten elektromagnetischen Induktion (TEM) entwickelt. Das System erfasst die Objekte drei-di-mensional und erzeugt damit eine hohe Datendichte, mit der eine Klassifizierung bzw. Unterscheidung von nicht-axialsymmetrischem Zivilschrott und axial-symmetrischer Munition ermöglicht werden soll. Die Ergebnisse leisten einen signifikanten Beitrag zur Reduk-tion der Mehrdeutigkeit der Objektbewertung. Durch die Eigenent-wicklung des TEM-Systems wurden detaillierte Kenntnisse über Funktionsweise, Einflussfaktoren und Optimierungsmöglichkeiten gewonnen und eine gezielte Anpassung an spezifische Einsatz-zenarien ermöglicht.

Um die Sicherheit und Effizienz der Bergungs- und Demontage-prozesse zu gewährleisten, wurde ein funktionales Modell für die Entsorgungskette entwickelt, um eine risikoarme und gleichzeitig wirtschaftlich günstige Entwicklung einer Bergungsplattform zu ermöglichen. Weiterhin wurde untersucht, wie das Fundament einer Delaborationskammer ausgelegt sein muss, damit im Falle einer ungewollten Detonation, die freiwerdende Energie auf die Kammer beschränkt bleibt, und Schäden an der Schiffsstruktur verhindert werden. Ein bereits existierender Prototyp eines Hebetools zur

Bergung von UxO wurde im Einsatzraum Ostsee getestet, um dessen Zuverlässigkeit und Einsatzfähigkeit nachzuweisen. Abschließend wurde untersucht, ob und wie im Falle einer ungewollten Detonation während der Delaboration durch Wassernebel innerhalb der Delaborationskammer das Detonationsverhalten verändert werden kann, um Schäden zu minimieren. Durch die erfolgreiche Bearbeitung dieser Kernaspekte hat das IRAV-Projekt einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung einer sicheren und effizienten Entsorgungskette für Munitionsverklappungsgebiete geleistet und die Grundlage für nachfolgende Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten geschaffen.

4. Projektergebnisse

Innerhalb des IRAV-Projekts wurden signifikante Fortschritte bei der Kartierung und Untersuchung von Verklappungsgebieten erzielt und die Voraussetzungen für eine effiziente Räumung geschaffen. Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Technologien stellen einen wichtigen Schritt hin zu einer verbesserten Sicherheit und Umweltschonung dar.

4.1 Großflächige Datenerfassung

Ein zentraler Erfolg des Projekts war die erfolgreiche Integration verschiedener Sensorik an das SeaCat AUV und die damit verbundene Fähigkeit zur großflächigen Datenerfassung. Die Anbindung eines gezogenen Gradiometers ermöglichte die Reduzierung der Projektkosten und schuf gleichzeitig die Basis für die Implementierung eines neueren, optimierten Gradiometers zur verbesserten UxO-Detektion. Im ersten Messkampagnenlauf konnte durch den Einsatz von Fächerecholot, SSS, SAS und Magnetometer eine umfassende Datengrundlage gewonnen werden. Der Einsatz von zwei SeaCat AUVs mit unterschiedlicher Ausstattung trug zur Effizienz der Kartierung und Detailvermessung bei, wobei Einzelobjekte bis zu 4 m Größe und Kraterstrukturen mit bis zu 50 m Durchmesser lokalisiert werden konnten. Abbildung 1 zeigt das Bergen der SeaCat AUVs nach erfolgreicher Datenaufnahme am Ende des Tages.

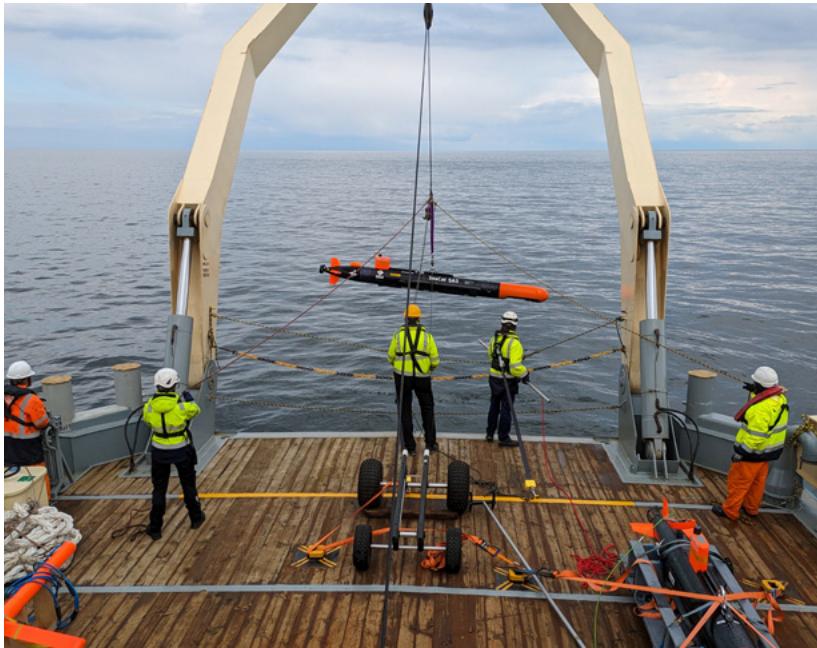


Abb. 1: Einsatz des SeaCat AUVs während der ersten Messausfahrt

Die zweite Messkampagne im Verklappungsgebiet BLB05L bestätigte die Leistungsfähigkeit der integrierten Sensorik und lieferte wichtige Referenzdaten für die weitere Projektarbeit. Durch den Einsatz von Fächerecholot (Schiff), RangerSAS (AUV) und dem MicroEel Streamer (AUV) konnte eine detaillierte Datenerfassung durchgeführt werden. Das RangerSAS erwies sich als kostengünstige Alternative zum KrakenSAS und lieferte vielversprechende Ergebnisse bei der Detektion von Objekten im Verklappungsgebiet. Obwohl die ersten Tests mit dem MicroEel Streamer technische Herausforderungen mit sich brachten, konnten nach Unterstützung aus Bremen brauchbare Daten gewonnen werden, die die seismische Charakterisierung des Untergrunds unterstützen.

4.2 Seismisches Messsystem

Zu Beginn des Projekts wurden die Anforderungsdefinition des zu entwickelnden seismischen Messsystems, sowie begleitende

numerische Modellierungen erfolgreich abgeschlossen, wodurch die technische Machbarkeit der vorgesehenen Konzepte bestätigt werden konnte. Diese vorbereitenden Schritte bildeten eine solide Grundlage für die detaillierte Systemauslegung und die anschließende Umsetzung.

Das seismische Mehrkanal-Synthetic-Aperture-Messsystem wurde vollständig montiert und getestet. Alle Hauptkomponenten, darunter Hydrophone, Positionierungseinheiten und Steuerelektronik, konnten trotz logistischer Herausforderungen beschafft und erfolgreich integriert werden. In Indoor-Versuchen in Bremerhaven wurden Schwimmfähigkeit, Schleppstabilität mit der EIVA-ScanFish-III-Plattform (ein ROTV) sowie die allgemeine Systemfunktionalität erfolgreich überprüft. Der speziell angepasste seismische Rahmen wurde mit 30 Hydrofonen, einer Motion Reference Unit (MRU), einem Doppler Velocity Log (DVL) und einem wasserdichten Elektronikgehäuse zur Signalaufbereitung, Datenaufzeichnung und Stromverteilung ausgestattet. Diese Konfiguration wurde für seichte Gewässer optimiert und für den Einsatz auf See vorbereitet. Abbildung 2 gibt Einblicke in einzelne Systemkomponenten und das Zuwasserbringen während der zweiten Messausfahrt in der deutschen Ostsee.

Trotz eines Geräteausfalls während der Feldmessungen, der die Datenerfassung verhinderte, konnten durch umfangreiche numerische Modellierung und Simulationen wertvolle Erkenntnisse gewonnen und synthetische Datensätze mit bekannten Referenzwerten erstellt werden. Diese dienten der Entwicklung und Evaluierung von Detektions- und Charakterisierungsverfahren mittels überwachten maschinellen Lernens und unterstützen die Verfeinerung der Auswertekette. Parallel dazu wurden fortgeschrittene Datenanalyseverfahren entwickelt, darunter Strategien zur Kompensation von Positionsungenauigkeiten, zur Verbesserung der zeitlichen Auflösung mittels Deghosting-Methoden und erste Konzepte für AVO-Analysen, um die Materialcharakterisierung von UxO zu verbessern und die Basis für künftige Feldeinsätze zu legen.

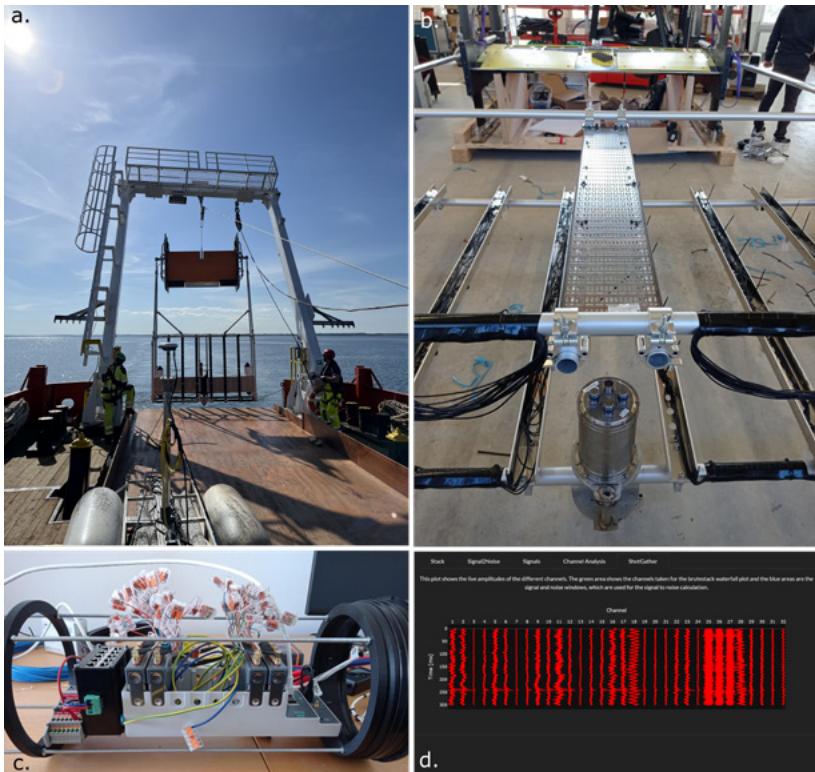


Abb. 2: a: Einsatz des Demonstrators während der zweiten Messausfahrt in der deutschen Ostsee, b: Rahmen mit montierten Hydrophonen und Positionierungssystemen, c: Registrierapparatur, d: Webinterface mit Echtzeitvisualisierung der Daten

4.3 Demonstrator des TEM-Systems

Im Berichtszeitraum wurde ein funktionsfähiger Demonstrator fertiggestellt (s. Abbildung 3) und in ein ROV mechanisch und elektronisch integriert. Die Messtechnik wurde gefertigt und in druckneutralen und wasserdichten Gehäusen verbaut sowie die Steuerungs- und Datenerfassungseinheiten implementiert. Für die Positionierung wurden die internen Positionierungsdaten des ROV genutzt. In einer Reihe von Integrationstests an Land und in einem Hafenbecken wurde das Zusammenwirken von ROV und Messsystem unter vereinfachten Bedingungen untersucht. Dabei wurde die mechanische Belastbarkeit, die elektromagnetische Signalqualität und die Stabilität des Gesamtsystems überprüft.



Abb. 3: Demonstrator des TEM-Systems während des Einsatzes bei der Messkampagne

In einem anschließenden Einsatz unter realen maritimen Bedingungen in einem Munitionsversenkungsgebiet in der Lübecker Bucht konnte ein definiertes, axialsymmetrisches Testobjekt aus Stahl von etwa 50 kg Masse zuverlässig detektiert werden. Des Weiteren wurden zwei reale Objekte untersucht, welche bei einer vorherigen Messkampagne als mögliches Zielobjekt identifiziert wurden. Dabei zeigte sich, dass die Reichweite des Messsystems derzeit noch begrenzt ist, weshalb die Entwicklung leistungsstärkerer Sendespulen vorgesehen ist.

Die Tests bestätigten die grundlegende Funktionsfähigkeit der Messtechnik, machten aber auch Optimierungspotenziale bei der Positionsgenauigkeit des ROV deutlich. Die ROV-gestützte visuelle Inspektion erwies sich als wertvolle Ergänzung, um detektierte Objekte vor Ort zu begutachten (s. Abbildung 4).

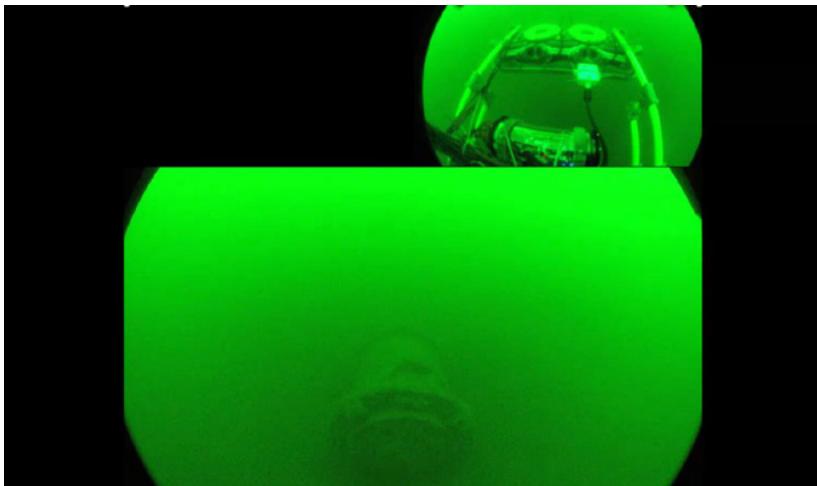


Abb. 4: Unterwasseraufnahme eines Objektes während des Messeinsatzes in der Lübecker Bucht

Die gewonnenen Erfahrungen bei der Datenprozessierung und -klassifizierung bilden eine solide Basis für weitere Optimierungen und Folgeentwicklungen. Langfristig kann die Technologie dazu beitragen, die Effizienz, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Detektions- und Räumungseinsätzen nachhaltig zu steigern.

4.4 Entwicklung einer Delaborationsplatform

Ergänzend zur Kartierung wurden wesentliche Komponenten für die Bergung von Altlasten entwickelt und getestet. Die erste Iteration der Systemanforderungen und deren Verifikationskriterien wurde abgeschlossen, basierend auf bestehenden Anforderungen und ergänzt durch Annahmen bei fehlenden Informationen.

Die Fundamentierung der Delaborationskammer mittels plastischer Zugfedern als Lagerung wurde als optimale Lösung identifiziert, basierend auf umfassenden Untersuchungen verschiedener Konzepte. FEM-Simulationen bestätigten die Funktionalität und ausreichende Reserven dieser Konstruktion, indem sie eine beherrschbare Auslenkung der Kammer bei Detonationen und geringe Kräfte auf die Bergeplattform zeigten.

Für die standardisierte Bergung von Munition, welche ein Schlüssel-element für die großflächige Entsorgung von Altlasten aus dem Meer darstellt, hat TKMS ein Bergetool mit einer dazu passenden Standardpalette entwickelt, die die Schnittstelle zwischen Bergung und Entsorgung definiert und die die jeweiligen Bedürfnisse der beiden Prozessbeteiligten berücksichtigt. Bergetool und Palette wurden im Rahmen von IRAV auf See getestet. Die Ergebnisse dieser Tests dienten der Validierung des Designs und lieferten wertvolle Informationen für weitere Detaillverbesserungen, die ein noch robusteres Design ermöglichen.



Abb. 5: Bergetool für die standardisierte Bergung und Zuführung von Munition zur Entsorgungsplattform beim Seetest

Zusätzliche Untersuchungen zum Einfluss von Wassernebel auf Detonationen bestätigten, dass der Einsatz von Wassernebel die

Belastungsspitzen bei ungewollten Umsetzungen mildern kann, was entweder die Verarbeitung höherer Sprengstoffmengen oder eine leichtere Konstruktion der Kammer ermöglicht.

4.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse und Zukunftsperspektiven

Parallel zur Datenerfassung wurde eine Analyse der Wirtschaftlichkeit einer langfristigen Tätigkeit im Bereich der Altlasten-Bergung durchgeführt, die vielversprechende Perspektiven für die zukünftige Anwendung der entwickelten Technologien aufzeigt. Die gewonnenen Daten verdeutlichen die Komplexität von Verklappungsgebieten und die Notwendigkeit einer präzisen Lokalisierung und Klassifizierung der Altlasten, wodurch die Grundlage für effektive Bergungs- und Entsorgungsmaßnahmen geschaffen wird. Die Ergebnisse des IRAV-Projekts bilden eine solide Basis für die Weiterentwicklung automatisierter Klassifizierungsverfahren im Folgeprojekt IRAV2 und tragen zur Verbesserung der Sicherheit und Umweltschonung in marinen Umgebungen bei.

5. Verwertung

Die im Projekt IRAV entwickelten Sensoren und Prototypen werden auch in Zukunft von den Projektbeteiligten weiterentwickelt und zur UXO Beseitigung eingesetzt.

5.1 TKMS ATLAS ELEKTRONIK

Die TKMS ATLAS ELEKTRONIK plant, aus dem neuen Aufbau des SeaCat AUVs mit dem SAS Sensor einen Prototypen zu erarbeiten und strebt einen Prototypenaufbau für die Systemkonfiguration mit den Magnetometern und dem SeaCat AUV an. Auch das Seismik-Array in Kombination mit der SeaCat ist zur Prototypenentwicklung in Planung. Diese Systemkonfigurationen können durch geeignete Kunden in das Produktportfolio übernommen werden.

Neben diesen potenziellen Erweiterungen des Produktportfolios wurden die in den Messausfahrten gesammelten Fähigkeiten durch Spezialisten im Offshore-Bereich im Tochterunternehmen TKMS

Maridan integriert. Dieses wurde explizit für das Offshore-Survey Geschäft und insbesondere zur Detektion und Klassifikation von UxO gegründet. Die Anwendung dieser Fähigkeiten kann somit sowohl bei TKMS ATLAS ELEKTRONIK als auch über TKMS Maridan (primär für zivile Themen wie beispielsweise die UxO-Detektion und -Klassifikation) angeboten werden.

Die in den Messausfahrten aufgenommenen und bereits aufbereiteten und gelabelten Daten sollen in einem weiteren Fördervorhaben verwendet werden, um die Detektion bis hin zur Klassifikation in einem hochautomatisierten Schritt umzusetzen. Das Training eines derartigen Algorithmus soll zu einem weiteren demonstrationsfähigen System führen, welches die Industrialisierung des Gesamtprozesses ermöglichen kann.

5.2 IWES

Obwohl ein Geräteausfall während der ersten Messfahrt die Erfassung von ersten Felddaten verhinderten, konnte im Projekt ein voll funktionsfähiger Demonstrator entwickelt werden, dessen Konstruktion und Integration unter kontrollierten Bedingungen umfassend getestet wurden. Das reparierte Messsystem soll Ende Oktober im Rahmen einer Folgemessung mit derselben Hardware und ohne zusätzliche Investitionen erneut eingesetzt werden. Ziel dieser Messung ist es, unter realen Einsatzbedingungen repräsentative Daten zu erheben und damit die praktische Funktionsfähigkeit des Demonstrators zu bestätigen.

Nach erfolgreicher Validierung wird das System bereit sein, in operative Arbeitsabläufe zur Detektion von UxO in Flachwasserbereichen integriert zu werden. Sein modularer Aufbau ermöglicht gezielte, kostengünstige Aufrüstungen des seismischen Rahmens, um es an unterschiedliche Messbedingungen anzupassen. Diese Flexibilität erhöht die Wettbewerbsfähigkeit des Systems im maritimen Vermessungsmarkt und steigert die Wahrscheinlichkeit einer Übernahme durch Industriepartner.

Mit Blick auf die Zukunft sollen die Ergebnisse des Einsatzes im Oktober / November dazu dienen, die technische Leistungsfähigkeit zu bestätigen und das System für den erfolgreichen Einsatz auf hoher See zu qualifizieren. In nachfolgenden Anstrengungen können Verbesserungen der Auswertemethoden sowie Verfeinerungen der Hardware – etwa durch Erweiterung der akustischen Kanäle und Reduzierung von Strömungsgeräuschen – mit minimalem Aufwand umgesetzt werden. Das System weist ein klares Potenzial für die Aufnahme in spezialisierte Dienstleistungsangebote auf.

5.3 STASCHEIT

Die erlangten Ergebnisse bilden das Fundament für die Weiterentwicklung des Demonstrators. Die Technologie ist für verschiedene Anwendergruppen von Interesse, sowohl für industrielle Auftraggeber im Offshore- und Hafenbereich als auch für öffentliche Institutionen im Bereich Sicherheit und Umweltschutz. Der im Projekt entwickelte Demonstrator soll nach Projektabschluss in das bestehende Produktpotfolio der STASCHEIT Kampfmittelräumung GmbH integriert und in unterschiedlichen Einsatzszenarien eingesetzt werden. Der modulare Aufbau ermöglicht die Anpassung an verschiedene Umgebungen (küstennahe Gewässer, Binnengewässer, Land).

Im Verlauf des Vorhabens wurde das Team im Bereich Forschung und Entwicklung erweitert und etabliert, wodurch zusätzliche Arbeitsplätze geschaffen und bestehende Kompetenzen langfristig gesichert werden konnten. Die im Projekt erarbeiteten technischen und methodischen Fortschritte tragen dazu bei, die Position des Unternehmens im Wettbewerbsumfeld zu stärken und neue Märkte zu erschließen.

Die im Projekt gewonnenen Kenntnisse der Datenerfassung, -aufbereitung und -verarbeitung bilden die Grundlage für künftige Systementwicklungen sowie Kooperationen mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie.

5.4 TKMS

Die Bergung und Entsorgung von UxO aus Verklappungsgebieten rückt zunehmend in den Fokus von Öffentlichkeit und Regierung, da toxikologische Untersuchungen eine Belastung von Umwelt und Nahrungskette zeigen. Es besteht ein europa- und weltweit wachsender Bedarf an einer Lösung, für die derzeit keine industrielle Lösung verfügbar ist.

Die im Rahmen von IRAV durchgeführten Arbeiten helfen bei der Beseitigung etwaiger Technologielücken und ermöglichen einen risikoärmeren Start in die großskalierte Entsorgung von Altlasten aus dem Meer.

Das Sofortprogramm Munitionsaltlasten in Nord- und Ostsee der Bundesregierung zielt auf die Entwicklung einer Bergeplattform ab, die diese Anforderungen erfüllt. Aktuell läuft die Ausschreibung für Definition, Entwicklung und gegebenenfalls Bau einer solchen Plattform mit einem Auftragsvolumen von ca. 65 Mio. €.

Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten werden als hoch bewertet, da die grundlegenden Konzepte vorhanden sind, die Entwicklungsschritte sich auf Details konzentrieren und das Sofortprogramm sich inzwischen darauf konzentriert, an Land bereits bewährte Technologie auf See zu transferieren. Die eigentliche Bergung und Entsorgung wird eine erhebliche Anzahl kleiner und mittelständischer Unternehmen einbinden und somit einen wirtschaftlichen Bedarf sowohl decken als auch erzeugen.

6. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das IRAV-Projekt einen bedeutenden Schritt in der Entwicklung innovativer Lösungen für die Detektion, Klassifikation, Bergung und Entsorgung von UxO in Verkippungsgebieten darstellt. Durch die erfolgreiche Entwicklung und Erprobung neuer Sensoren, Prototypen und Plattformen hat das Projekt eine solide Grundlage für zukünftige Aktivitäten im Bereich der maritimen Altlastenbewältigung geschaffen. Die Ergebnisse bilden die Basis für die Weiterentwicklung von automatisierten Klassifizierungsverfahren im Folgeprojekt IRAV2 und versprechen einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit und des Umweltschutzes in unseren Meeren. Die enge Zusammenarbeit der Projektbeteiligten hat sich als äußerst fruchtbar erwiesen und wird auch in Zukunft eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung dieser komplexen Herausforderungen spielen.

Danksagung

Das Projektkonsortium möchte sich herzlich beim Projektträger Jülich (PtJ) für die professionelle Administration und die wertvolle Unterstützung während der Projektlaufzeit bedanken. Weiterhin gilt unser Dank dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) für die finanzielle Förderung des IRAV-Projektes.

Literatur

Erneuerbare Energien (20.02.2014): „Drei Missverständnisse um den Windpark Riffgat“, <https://wwwerneuerbareenergien.de/archiv/die-drei-missverstaendnisse-um-den-windpark-riffgat-150-469-77013.html>

Schriftenreihe Projektträger Jülich

1. Technologie- und Erkenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Industrie Eine explorative Untersuchung in der deutschen Material- und Werkstoffforschung hrsg. von A. Pechmann, F. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten ISBN: 978-3-89336-624-8
2. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten ISBN: 978-3-89336-677-4
3. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten ISBN: 978-3-89336-745-0
4. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten ISBN: 978-3-89336-832-7
5. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten ISBN: 978-3-89336-922-5
6. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten ISBN: 978-3-95806-006-7
7. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN Tagungsband der Statustagung 2015 (2015), 196 Seiten ISBN: 978-3-95806-104-0
8. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN Tagungsband der Statustagung 2016 (2016), 220 Seiten ISBN: 978-3-95806-187-3

9. STATUSSEMINAR MEERESFORSCHUNG mit FS SONNE
14.-15. Februar 2017 in Oldenburg – Tagungsband (2017), 221 Seiten
ISBN: 978-3-95806-207-8

10. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2017 (2017), 224 Seiten
ISBN: 978-3-95806-277-1

11. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2018 (2018), 224 Seiten
ISBN: 978-3-95806-366-2
275

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

13. STATUS CONFERENCE RESEARCH VESSELS 2020
Conference transcript | Online-Publikation (2020), 409 Seiten
ISBN: 978-3-95806-479-9

14. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2021 (2021), 289 Seiten
ISBN 978-3-95806-594-9

15. STATUS CONFERENCE RESEARCH VESSELS 2022
Conference transcript
Online-Publikation (2022), 476 Seiten
ISBN: 978-3-95806-608-3

16. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2022 (2022), 285 Seiten
ISBN 978-3-95806-673-1

17. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2023 (2023), 275 Seiten
ISBN 978-3-95806-732-5

18. STATUS CONFERENCE RESEARCH VESSELS 2024
Conference transcript
Online-Publikation (2024), 574 Seiten
ISBN: 973-3-95806-747-9

19. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2024 (2024), 313 Seiten
ISBN 978-3-95806-798-1

20. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2025 (2025), 423 Seiten
ISBN 978-3-95806-873-5

