



projektträger  
jülich

# Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2024

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 (BMWK) gefördert. Der Tagungsband wurde aus Projektfördermitteln des BMWK finanziert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

Telefon 02461 61 - 53 68

Telefax 02461 61 - 61 03

E-Mail [zb-publikation@fz-juelich.de](mailto:zb-publikation@fz-juelich.de)

Internet [www.fz-juelich.de/zb](http://www.fz-juelich.de/zb)

Satz und Layout  
Projektträger Jülich

Schriftenreihe Projektträger Jülich  
ISBN 978-3-95806-798-1

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JuSER) unter:  
[www.fz-juelich.de/zb/openaccess](http://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 2024**



# Vorwort

Die maritime Wirtschaft in Deutschland braucht Antworten auf globale Herausforderungen: Klimaneutralität, Umweltschutz, Digitalisierung und Sicherheit. Längst befindet sich die Branche inmitten einer tiefgreifenden Transformation, die kluge unternehmerische Entscheidungen erfordert, aber auch große wirtschaftliche Chancen bietet. Allein die maritime Energiewende ist mit einem Milliardenmarkt verbunden.

Für unsere exportorientierte Gesamtwirtschaft in Deutschland ist die maritime Branche von strategischer Bedeutung. Sie sichert den Zugang zum weltweiten Handel auf dem Seeweg, zu neuen Ressourcen sowie zu einer nachhaltigen Energieerzeugung auf den Meeren. Nur mit leistungsstarken und emissionsarmen Schiffen, Logistikketten und Häfen werden wir unsere ambitionierten Klimaziele erreichen.

Allerdings müssen Unternehmen der Schiffbauindustrie und der Meerestechnik in einem harten internationalen Wettbewerb bestehen. Der größte Wettbewerbsvorteil unserer Branche ist das hochspezialisierte maritime Know-how verbunden mit unternehmerischem Ideenreichtum. Diese Wachstumsfaktoren stärken wir seit vielen Jahren mit einer gezielten Förderung im Rahmen des Maritimen Forschungsprogramms. Dadurch entstehen aus Ideen und Visionen innovative und marktfähige Zukunftstechnologien in Schiffbau, Schifffahrt, Offshore-Windenergie und Meerestechnik.

Der vorliegende Tagungsband zur Statustagung Maritime Technologien zeigt einmal mehr, dass wir mit klarem Kurs in die maritime Zukunft steuern. Unser Ingenieurwissen war schon immer Schlüssel für neue innovative Technologien. Daher möchte ich Sie ermuntern, während der Statustagung über Fachgrenzen hinweg zu diskutieren, Ihre Fragen und Beobachtungen einzubringen sowie neue Perspektiven kennen zu lernen. Ich freue mich auf inspirierende Diskussionen und den persönlichen Austausch mit Ihnen! Zudem wünsche ich Ihnen eine interessante Lektüre und wertvolle Impulse.

Dieter Janecek

Koordinator der Bundesregierung für  
die Maritime Wirtschaft und Tourismus



# Inhalt

<b>EnviSim4Mare</b>	<b>11</b>
Realisierung experimenteller Untersuchungen von lebendem marinem Bewuchs an Offshore-Windenergieanlagen durch die Errichtung des Salzwasser-Wellen-Strömungskanals	
<b>FernBin</b>	<b>25</b>
Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt	
<b>SubseaSlide</b>	<b>35</b>
Verschleißbeständige, energieeffiziente und zuverlässige Komponenten für Subsea-Anwendungen	
<b>DigitShip</b>	<b>47</b>
Erfassung, Analyse und Verwertung von Betriebsdaten für effiziente und sichere Schiffe	
<b>Greenlight</b>	<b>63</b>
Biobasierte Faserverbundwerkstoffe für strukturellen Leichtbau in Schiffen	
<b>DeffProForm</b>	<b>75</b>
Design von effizienten Schiffspropellern mit unkonventioneller Formgebung	
<b>FlexiGen</b>	<b>93</b>
Flexible und effiziente Generierung von unikaten Schiffsbauanteilen mittels eines innovativen laserunterstützten additiven Fertigungsprozesses	
<b>SUSY</b>	<b>107</b>
Gleichstrom-Energieversorgung auf Schiffen	

<b>MariData</b>	<b>123</b>
Umfassende Technologien für das Energiemanagement von Schiffen - Ein digitaler Zwilling für die Optimierung des Schiffsbetriebs	
<b>TOxAR</b>	<b>133</b>
Entwicklung eines digitalen Echtzeit-Messsystems für gelöste Schadstoffe im Unterwasser-Umgebungsbereich von Tauchern	
<b>LeiQaS</b>	<b>147</b>
Leise Querstrahler – Reduzierung der Schallemission von Querstrahlanlagen mit Methoden der aktiven Schwingungsreduktion	
<b>FlaBi</b>	<b>163</b>
Entwicklung von Binnenschiffen für extreme Niedrigwasserbedingungen	
<b>Binsmart</b>	<b>177</b>
Innovative Technologien für die Binnenschifffahrt	
<b>Imokat II</b>	<b>191</b>
Entwicklung eines innovativen Methanoxidationskatalysators zur Senkung der Abgasemissionen von Großmotoren für maritime und stationäre Anwendung im Gasbetrieb	
<b>MVDC4S</b>	<b>203</b>
Erforschung von DC-Mittelspannungs-Verteilnetzen zum umweltschonenden Betrieb von Schiffen	
<b>Charisma</b>	<b>219</b>
Cyber-physische Antriebsmodule für maritime Anwendungen	
<b>Prilliand</b>	<b>231</b>
Additive Produktionstechnologie zur Herstellung Kunststoffbasierter Komponenten für maritime Anwendungen	
<b>Deep Sea Sampling I</b>	<b>241</b>

<b>Folami</b>	<b>255</b>
Formschlüssiges Laserstrahlschweißen der Mischverbindung aus Stahl und Aluminium für betriebsfeste Halbzeuge im Schiffbau	
<b>SpuDis</b>	<b>271</b>
Ein modularer Softsensor für Maritime Pumpen	
<b>Probannt</b>	<b>285</b>
Entscheidungsunterstützung bei der Kampfmittelräumung im Meer	
<b>Nemo</b>	<b>297</b>
Nachhaltige Erweiterung maritimer Observation	



# EnviSim4Mare

## Realisierung experimenteller Untersuchungen von lebendem marinem Bewuchs an Offshore-Windenergieanlagen durch die Errichtung des Salzwasser-Wellen-Strömungskanals

### Autorenliste

Dr.-Ing. Clemens Krautwald	TU Braunschweig
Dr.-Ing. David Schürenkamp	TU Braunschweig
Dr.-Ing. Constantin Schweiger	TU Braunschweig
Dipl.-Ing. Albrecht Victor	Jörss-Blunck-Ordemann GmbH
Dr.-Ing. Sebastian Kelma	Jörss-Blunck-Ordemann GmbH
Prof. Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg	TU Braunschweig

---

### Motivation und Nutzung

Der Klimawandel und die Notwendigkeit, die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, erhöhen den Druck auf Länder weltweit, den Anteil erneuerbarer Energien deutlich auszubauen. Die Offshore-Windenergie in der Nord- und Ostsee spielen in Deutschland eine wichtige Rolle bei der Erreichung dieser Klimaziele und besitzt ein enormes Potenzial für die zukünftige Energieversorgung. Um die im Pariser Abkommen festgelegten Verpflichtungen einzuhalten, plant Deutschland, die Stromerzeugung der Offshore-Windenergie von 7,75 GW im Jahr 2020 auf 22 GW in 2030, 60 GW bis 2037 und 70 GW in 2045 auszubauen (BMWK, 2024; Musial et al., 2021). Dieser Ausbau stellt einen erheblichen Zuwachs dar und ist ein wesentlicher Bestandteil der nationalen Strategie zur signifikanten Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie zur Förderung des Übergangs zu einer klimaneutralen Wirtschaft. Offshore-Windenergie weist im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energiequellen, die durch fluktuierende Energieerzeugung gekennzeichnet sind, den Vorteil einer hohen Anzahl an Volllaststunden auf und kann somit teilweise auch zur Deckung der Grundlast beitragen.

Allerdings wird bis zum Jahr 2037 eine Reihe von Offshore-Windparks das Ende der prognostizierten Lebensdauer erreichen, darunter Alpha Ventus und Baltic 1, die 2010 bzw. 2011 in Betrieb genommen wurden. Dies wirft die Frage auf, wie mit diesen Anlagen weiter verfahren wird und ob eine Weiternutzung in Abhängigkeit vom Zustand möglich ist. Einblicke hierzu liefern sogenannte Reassessment-Tools, mit deren Hilfe die während der Entwurfsphase angenommenen Lasten

unter Berücksichtigung aktueller Forschungsergebnisse neu bewertet werden können. Dadurch entsteht eine Neubewertung der bestehenden Anlagen und deren verbleibender Lebensdauer.

Um die Reassessment-Tools zu verbessern, ist eine präzise Bestimmung der aus Seegangsdaten resultierenden Lasten mittels analytischer Methoden von zentraler Bedeutung (Bouty et al., 2017; Ziegler und Muskulus, 2016). Diese Berechnungen basieren traditionell auf einer Vielzahl anwendbarer Normen (DNV-RP-C205, 2021; IEC 61400-3-1, 2020), die auf den Ergebnissen einfacher physikalischer Modellstudien beruhen (Sarpkaya, 1976; Sarpkaya, 1990; Wolfram und Naghipour, 1999; Wolfram und Theophanatos, 1985). In diesen Studien wurde der Effekt von marinem Bewuchs jedoch entweder nicht oder nur durch einfache Rauheitsmodelle berücksichtigt. Neuere Forschungen widmen sich zunehmend den komplexen und flexiblen Rauheitseffekten von hartem und weichem marinem Bewuchs (Baarholm und Skaugset, 2008; Flack und Schultz, 2010; Henry et al., 2016; Sun et al., 2020). Zu diesen Effekten zählen neben der zusätzlichen, potenziell asymmetrischen Gewichtslast auch Veränderungen der umgebenden Hydrodynamik, die Verstärkung von Biokorrosion und insbesondere die Erhöhung der hydrodynamischen Lasten. Diese Lasten können mittels der Morison-Gleichung berechnet werden, die sowohl den Strömungswiderstands- als auch den Trägheitskoeffizienten berücksichtigt (Morison et al., 1950; Wolfram und Naghipour, 1999). Beide Koeffizienten werden durch das Vorhandensein von marinem Bewuchs beeinflusst, wobei der Anstieg des Strömungswiderstands sowohl in der Normung als auch in der Wissenschaft als erhöht bewertet wird, während die Betrachtungen des Trägheitskoeffizienten schwanken (Landmann et al., 2021; Marty et al., 2022). Die genauen Auswirkungen bei realitätsnahen Reynolds- und Keulegan-Carpenter-Zahlen sind jedoch bisher nicht abschließend untersucht worden (Bakhtiari et al., 2018; Maduka et al., 2023). Sowohl die Rauheiten als auch die Bewegungen von flexiblem marinem Bewuchs, wie etwa Algen, beeinflussen diese Koeffizienten (Aalami Harandi et al., 2024; Henry et al., 2016).

Rauheiten wurden in vergangenen Untersuchungen nur mittels einfacher Methoden parametrisiert, wobei insbesondere die relative Rauheit als Verhältnis der mittleren Rauheitshöhe zum Pfahldurchmesser  $\epsilon = k/D$  als einfache Charakterisierungs- und Vergleichsmöglichkeit genutzt worden ist. Der marine Bewuchs weist eine unregelmäßige Aufwuchsdicke auf, sodass diese Vereinfachung die in-situ Rauheit nicht vollständig abbildet. In der Übersicht von Chung et al. (2021) wird gezeigt, dass beispielsweise in der Flusshydraulik die Parametrisierung von Rauheiten über mehrere topographische Parameter der Oberfläche abgebildet werden kann. Hierfür können die Rauheitshöhe  $k$ , die frontale ( $\lambda_f$ ) oder planare ( $\lambda_p$ ) Solidität sowie der volumetrische Anteil des Festkörpers

im Vergleich zum Porenraum – beispielsweise ausgedrückt durch die Abbott-Firestone-Curve (AFC) – verwendet werden. Bislang fehlen hierzu Methoden, wie in klein skalierten Modellen von Rauheiten an Pfählen derartige Parameter erhoben sowie ausgewertet werden. Darüber hinaus fehlt es an Vergleichsdatensätzen von rauen Pfählen aus den Offshore-Bereichen, welche über die Tiefe, Ort und Zeit sehr unterschiedlich ausfallen (Mesel et al., 2015).

Die auf Offshore-Windenergieanlagen wirkenden welleninduzierten hydrodynamischen Lasten werden in der Praxis numerisch simuliert. Der Umfang der Simulationen, die für die Auslegung erforderlich sind, erlaubt jedoch keine Anwendung komplexer Strömungssimulationen. Für die Berechnung der welleninduzierten Lasten hat sich die semi-empirische Morison-Gleichung (Morison et al., 1950) etabliert, mit der Lasten senkrecht zur Mittelachse schlanker Kreisquerschnitte berechnet werden. Die Morison-Gleichung ist vor allem für schlanke Bauteile mit Durchmessern bis zu 20 % der Wellenlänge anwendbar, für geringere Wellenlängen bzw. größere Pfahldurchmesser ist eine Korrektur des Trägheitsterms erforderlich (Faltinsen, 1999; IEC 61400-3-1, 2020). Die Morison-Gleichung besteht aus einem Widerstands- und einem Trägheitsterm:

$$f = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot u \cdot |u| \cdot D + C_M \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot \dot{u} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

In diese Formel gehen die ungestörten horizontalen Orbitalgeschwindigkeiten  $u$  und -beschleunigung  $\dot{u}$  die Wasserdichte  $\rho_{\text{Wasser}}$  sowie der Pfahldurchmesser  $D$  ein. Die hydrodynamischen Beiwerte  $C_D$  und  $C_M$  hängen von den Strömungsbedingungen (s. Abb. 1), ausgedrückt durch die Reynolds-Zahl und Keulegan-Carpenter-Zahl, sowie des Querschnitts und der Oberflächenrauigkeit ab (DNV-RP-C205, 2021).

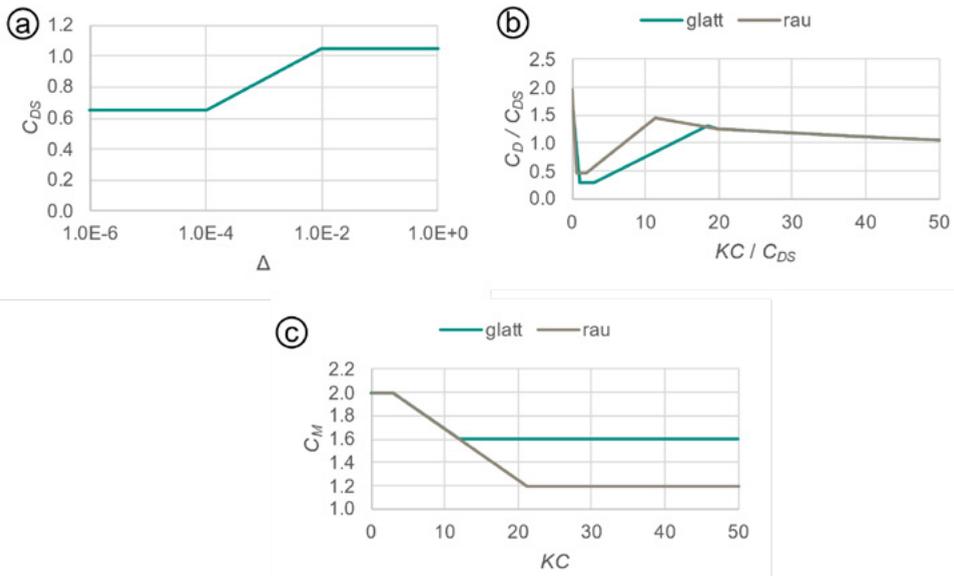


Abb. 1: Hydrodynamische Beiwerte  $C_{DS}$  (a),  $C_D/C_{DS}$  (b) und  $C_M$  in Abhängigkeit von der Keulegan-Carpenter-Zahl sowie für glatte und raue Pfahloberflächen ( $\Delta$  entspricht der relativen Rauheit  $\epsilon$ ).

## Methodik

Innerhalb des Forschungsvorhabens sind drei Hauptuntersuchungen vorgesehen, die jeweils unterschiedliche experimentelle Ansätze verfolgen: (1) Versuche mit einfachen Ersatzmodellen (S1), (2) Experimente mit parametrisierten, gedruckten Ersatzmodellen (S2) sowie (3) geplante Untersuchungen mit lebendem marinem Bewuchs (S3), auf die hier bereits ein Ausblick gegeben wird. Die experimentellen Einrichtungen werden im Folgenden zusammengefasst.

Die Experimente der Studien S1 und S2 wurden im Doppelwellenkanal des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau durchgeführt. Dieser Wellenkanal ist 90 m lang, 1,5 m hoch und 2 m breit. Zur Erzeugung von Wellen und Wellenspektren wird eine „Piston-type“-Wellenmaschine verwendet. Die Dämpfung reflektierter Wellen am Ende des Kanals erfolgt durch einen passiven Wellenabsorber sowie durch aktive Absorption an der Wellenmaschine (s. Abb. 2).

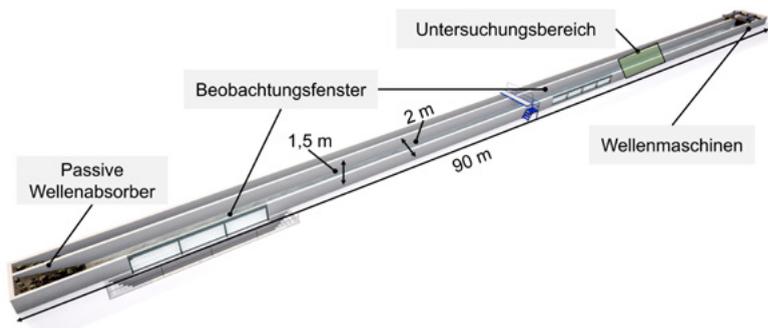


Abb. 2: Übersichtsskizze des 2m-Wellenkanals mit der Position der Wellenmaschine, dem Untersuchungsbereich, den Beobachtungsfenstern sowie dem passiven Wellenabsorber.

In der Studie S1 wurden Wellen mit Wellenhöhen zwischen 0,10 – 0,35 m bei Wellenperioden zwischen 2,0 – 4,0 s gewählt, während die Wellenperioden bei der Studie S2 zu 1,25 – 2,0 s bei gleichen Wellenhöhen geändert wurden. Die Zylinder hatten jeweils einen Durchmesser von 101,6 mm und eine Länge von 1,4 m bei einer Wassertiefe von 0,9 m. Eine Übersicht der verwendeten Versuchsmodelle in den Studien S1 und S2 ist in Abb. 3 dargestellt. Für die vorliegende Studie sind neben den Referenzzylindern insbesondere die Modelle (b) und (h) relevant. Diese entsprechen einerseits (b) einem Bewuchs durch kleine Miesmuscheln oder Seepocken ( $\epsilon = 0,0068$ ) und andererseits (h) einem Bewuchs durch eine sessile Artengemeinschaft nahe dem maximalen Wachstumsstand ( $\epsilon = 0,034$ ).

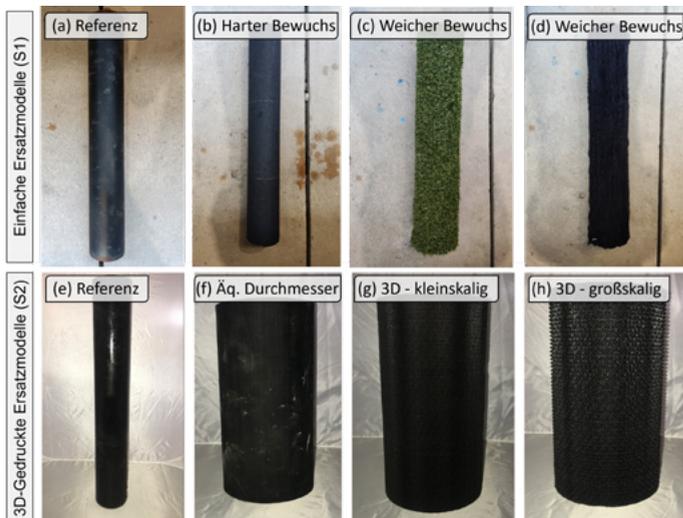


Abb. 3: Übersicht über die verwendeten Rauheitsmodelle in den Studien S1 (a-d) und S2 (e-h). In der Studie S1 wurde der raue Zylinder über Schleifpapier (vgl. Abb. 3 (b)) modelliert, während in der Studie S2 ein komplexerer Ansatz (vgl. Abb. 3 (h)) unter Modellierung und Druck von Artengemeinschaften (Miesmuscheln und Seepocken) genutzt wurde.

Für die Studie S3 wurde ein innovativer und weltweit einzigartiger Salzwasser-Wellen-Strömungskanal (SWS-Kanal) entwickelt und errichtet. Dieser Kanal ist mit zwei Wellenmaschinen ausgestattet, die sowohl zur Generierung in beiden Richtungen als auch zur aktiven Absorption der Wellen dienen. Dadurch kann im Beobachtungsbereich ein ungestörtes Wellenklima mit Wellenhöhen von bis zu 0,8 m erzeugt werden. Der SWS-Kanal verfügt über Abmessungen von 30 m Länge, 3 m Breite und 2,5 m Tiefe, was einen maximalen Wasserstand von 1,5 m ermöglicht.

Vier leistungsstarke Rohrschachtpumpen sorgen für eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 1,5 m/s und verfügen in Summe über eine Förderleistung von 4,5 m<sup>3</sup>/h. Besonders relevant für die Studie S3 ist das angeschlossene Hälterungsbecken sowie die integrierte Wasseraufbereitung. Diese ermöglichen das Einbringen lebender Organismen an den Probekörpern. Die Wasseraufbereitung gewährleistet eine stabile Wasserqualität, wobei der pH-Wert im Bereich von 7,3 bis 8,2 gehalten wird. Die Wassertemperatur im System kann zwischen 5 und 25 °C reguliert und der Salzgehalt kann auf die jeweiligen Bedarfe eingestellt werden (s. Abb. 4).

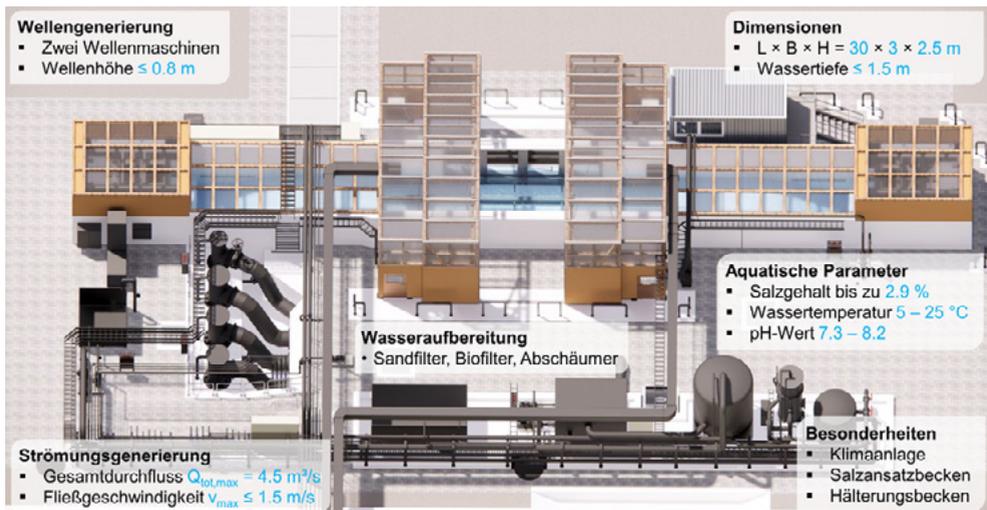


Abb. 4: Visualisierung des Salzwasser-Wellen-Strömungskanals und Beschreibung der jeweiligen Besonderheiten.

In der geplanten Studie S3 werden im SWS-Kanal Wellenrandbedingungen mit Wellenhöhen von 0,1 bis 0,8 m und Wellenperioden von 1,5 bis 5,0 s erzeugt. Diese Bedingungen dienen dazu, die in den vorangegangenen Untersuchungen mit Ersatzmodellen (S1 und S2) erstellten Versuchsmatrizen durch Experimente in der neuen Versuchsanlage zu erweitern und vergleichend zu analysieren (s. Abb. 5).



Abb. 5: Seitenansicht eines Referenz-Pfahlprobekörpers im Salzwasser-Wellen-Strömungskanal.

Aufgrund des veränderten Maßstabs ändern sich im Vergleich zu den vorherigen Experimenten auch die relevanten Parameter. Der Zylinderdurchmesser der untersuchten Probekörper beträgt 273 mm, während die Zylinderlänge 2 m bei einer Wassertiefe von 1,5 m entspricht. Ein wesentlicher Unterschied in dieser Untersuchung besteht darin, dass anstelle von Ersatzmodellen Probekörper mit lebendem marinem Bewuchs verwendet werden, um realitätsnähere Bedingungen zu schaffen.

### **Felduntersuchungen**

Die Felduntersuchungen bestehen insbesondere aus dem kontrollierten Anwachsen der Probekörper und der Beobachtung der Sukzession, wobei aufgrund der rauen Seegangsbedingungen an den Offshore-Standorten regelmäßige Wartungsintervalle stattfinden mussten. In der hier vorgestellten Studie werden die Felduntersuchungen anhand der in Wilhelmshaven exponierten Probekörpern beschrieben (s. Abb. 6). Die Probekörper wurden am 16.06.2022 ausgelagert und in Intervallen von drei bis sechs Monaten gewartet. Besonders während der Wintermonate, unter Sturmflutbedingungen, wurden die Wartungsintervalle möglichst kurz gehalten, um potenzielle Korrosionsprobleme oder Materialermüdung frühzeitig zu erkennen und zu beheben. Dies war entscheidend, um die Integrität der Probekörper und die Qualität der gewonnenen Daten sicherzustellen.

In Abb. 7 sind drei Zeitabschnitte dargestellt, die den jeweiligen Stand des Bewachsens durch marinen Bewuchs über zwei Jahre zeigen. Während der ersten Sukzessionsphase nach drei Monaten wurde beobachtet, dass sich Seepocken und Algen als erstes ansiedeln. Nach weiteren 17 Monaten hat sich eine Vielzahl unterschiedlicher mariner Organismen angesiedelt, beispielsweise Seepocken (Balanidae), Miesmuscheln (*Mytilus Edulis*), Nesseltieren (Cnidaria), Seesterne (Asteroidea) und Röhrenkrebse (Amphipoda), welche ein komplexes System an röhrenartigen Strukturen bauen, die wiederum aus Sedimenten, Algen, Detritus oder Muschelschalen bestehen. Nach vier weiteren Monaten erstrecken sich die

Bauten der Röhrenkrebse über weite Teile des Zylinders und haben ebenfalls viele Miesmuscheln überwachsen. Die Geometrie des marinen Bewuchses zu charakterisieren und zu parametrisieren, welcher zeitlich, über die Tiefe aber auch regional (Kerckhof et al., 2019) sehr variabel ist und sich an die vorherrschenden Bedingungen anpasst, ist aus Ingenieurssicht von besonderer Herausforderung.



Abb. 6: Karte der Standorte mit Probekörpern für die Felduntersuchungen.



Abb. 7: Gegenüberstellung dreier unterschiedlicher Zeitpunkte während der Sukzessionsphase von marinem Bewuchs an zylindrischen Probekörpern.

## Ergebnisse

Für weitere Kenntnisse hinsichtlich der Auswahl der Rauheitsmodelle und für einen Überblick der durchgeführten Studien S1 und S2 werden die Wasserspiegelauslenkungen und Lastzeitreihen verglichen. In Abb. 8 sind die gemessenen Zeitreihen der Wasserspiegelauslenkungen  $\eta$  und der horizontalen Kraft  $F_h$  für beide Studien gegenübergestellt. In beiden Studien wurden Wellenperioden von  $T = 2,0$  s genutzt, sodass für diese Wellenperiode eine mittlere Wellenhöhe ( $H = 0,2$  m) als Vergleichsrandbedingung genutzt wird.

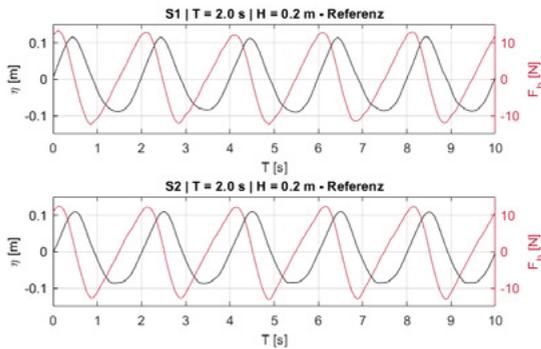


Abb. 8: Zeitreihen der Wasser-  
spiegelauslenkungen (schwarz,  
linke Y-Achse) und der horizontalen  
Kraft (rot, rechte Y-Achse) für die  
Studien S1 (a) und S2 (b) bei einer  
Wellenperiode von  $T = 2,0$  s und  
einer Wellenhöhe von  $H = 0,2$  m.

Abb. 8 zeigt die Wasserspiegelauslenkung und die horizontalen Kräfte auf einen Referenz-Zylinder für die gewählte Wellenrandbedingung über einen Zeitraum von 10 s. Sowohl die Wasserspiegelauslenkungen als auch die horizontalen Kräfte zeigen einen grundsätzlich vergleichbaren Verlauf. Die Wasserspiegelauslenkungen besitzen einen steilen Wellenberg mit einer Amplitude von etwa 0,11 m und ein flacheres Wellental mit 0,09 m, wodurch deren Verlauf über die Stokes Theorie 3. Ordnung approximiert werden kann. Die horizontalen Kräfte folgen einem zeitlich verschobenen Verlauf zur Wasserspiegelauslenkung, was auf die variierenden Anteile aus Strömungswiderstands- und Trägheitskraft zurückzuführen ist. Die maximalen horizontalen Kräfte liegen bei beiden Referenzzylinder um  $F_{h, \max} = \pm 12,5$  N.

Für die Bestimmung der Lastkoeffizienten ist es erforderlich, den Verlauf der horizontalen Orbitalgeschwindigkeiten und -beschleunigungen über die Zeit und die Wassertiefe zu kennen. Hierfür sind in Abb. 9 jeweils die Wasserspiegelauslenkung (a), horizontale Orbitalgeschwindigkeit (b) und die -beschleunigung (c) für eine Wellenperiode gezeigt.

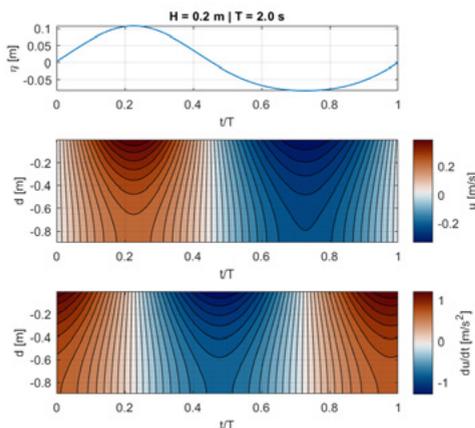


Abb. 9: Darstellung des zeitlichen  
Verlaufs nach der Stokes-Theorie  
3. Ordnung der (a) Wasserspiegel-  
auslenkung, (b) horizontalen  
Orbitalgeschwindigkeit und  
(c) horizontalen Orbitalbeschleu-  
nigung für eine Welle mit einer  
Wellenhöhe von  $H = 0,2$  m und  
einer Wellenperiode von  $T = 2,0$  s.

Aus dem Vergleich der Wasserspiegelauslenkung mit der horizontalen Orbitalgeschwindigkeit und -beschleunigung (Abb. 9 a-c) zeigt sich, dass zum Zeitpunkt des Wellenberges bei  $t/T = 0.22$  die Orbitalgeschwindigkeit ( $u_{max} = \pm 0,39 \text{ m/s}$ ) erreicht wird und andererseits der Beschleunigungsterm bei  $du/dt = 0 \text{ m/s}^2$  liegt. An diesem Zeitpunkt entsteht die Gesamtkraft nach der Morison-Gleichung ausschließlich aus der Widerstandskraft, wohingegen die Trägheitskraft minimal ist. Am Wendepunkt der Wasserspiegelauslenkung ist wiederum die horizontale Orbitalbeschleunigung ( $du/dt = \pm 1,26 \text{ m/s}^2$ ) und somit die Trägheitskraft maximal, während die Widerstandskraft minimal wird. Unter den meisten realitätsnahen Wellenrandbedingungen treten die maximalen Kräfte zwischen diesen beiden Extrema auf. Der jeweilige Anteil aus Widerstandskraft und Trägheitskraft wird insbesondere durch die Lastkoeffizienten bestimmt, welche sich je nach Wellenrandbedingung (insbesondere Reynolds-,  $Re$ , und Keulegan-Carpenter-Zahlen,  $KC$ ) und Rauheit des Probekörpers unterscheiden. Für einen Vergleich der auftretenden Lasten für glatte und raue Probekörper ist in Abb. 10 jeweils ein Rauheitsmodell und das studienspezifische Referenzmodell gegenübergestellt.

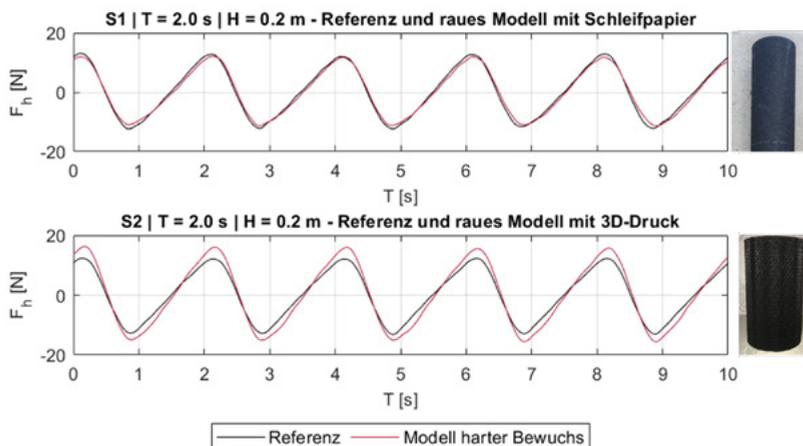


Abb. 10: Gegenüberstellung der horizontalen Lasten für den Referenzzylinder ohne Rauheit und dem Modell von hartem Bewuchs für (a) Studie S1 und (b) Studie S2. In der Studie S1 wurde der raue Zylinder über Schleifpapier (vgl. Abb. 3 (b)) modelliert, während in der Studie S2 ein komplexerer Ansatz (vgl. Abb. 3 (h)) unter Modellierung und Druck von Artengemeinschaften (Miesmuscheln und Seepocken) genutzt wurde.

Aus Abb. 10 wird ersichtlich, dass die unterschiedlichen Modellierungen von marinem Bewuchs auch unterschiedlich große Effekte auf die aufgenommenen Lasten haben. Bei der Studie S1 wird über ein dünnes Schleifpapier der Rauheitseffekt beispielsweise von flächig verteilten Seepocken nachgebildet ( $\epsilon = 0,0068$ ). Bei den 3D-gedruckten Modellen aus Studie S2 sind die Rauheitskörper deutlich

dichter über den gesamten Zylinder verteilt und besitzen eine höhere relative Rauheit von  $\varepsilon = 0,034$ . Die horizontalen Kräfte sind somit für Studie S1 nahezu deckungsgleich mit der Referenz, während die maximalen Kräfte für das 3D-gedruckte Modell um durchschnittlich 30 % von 12,2 N auf 15,8 N ansteigen. Die Wahl der geometrischen Parameter (relative Rauheit, Dichte des marinen Bewuchses, und Weitere) haben somit einen entscheidenden Einfluss auf die horizontalen Kräfte.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Diese Untersuchung befasst sich mit der Bestimmung der hydrodynamischen Lasten auf Offshore-Strukturen, insbesondere unter Berücksichtigung der Rauheitseffekte durch marinen Bewuchs. Traditionelle Berechnungsansätze, basierend auf Normen und einfachen Modellen, vernachlässigen bislang die komplexen Einflüsse des Bewuchses auf die Strömungsverhältnisse und die resultierenden Kräfte. Anhand von Versuchen mit verschiedenen Rauheitsmodellen, darunter einfache Ersatzmodelle und realitätsnähere 3D-gedruckte Modelle, wurde gezeigt, dass die Wahl der geometrischen Parameter, wie relative Rauheit und Dichte des Bewuchses, einen signifikanten Einfluss auf die hydrodynamischen Lasten hat. Insbesondere führen komplexere Modelle zu einem Anstieg der horizontalen Kräfte um bis zu 30 %. Mithilfe von Felduntersuchungen zur Vorbereitung von Experimenten im neu errichteten SWS-Kanal konnte darüber hinaus ein Einblick in die zeitliche Varianz von marinem Bewuchs gewonnen werden.

Die Ergebnisse der Studie unterstreichen die Notwendigkeit, die Rauheit von marinem Bewuchs detaillierter zu charakterisieren und präzisere Parametrisierungsmethoden zu entwickeln. Zukünftige Arbeiten sollten sich auf die Erhebung topografischer Parameter und den Aufbau umfassender Vergleichsdaten für Offshore-Bereiche konzentrieren. Insbesondere die geplanten Untersuchungen mit lebendem marinem Bewuchs in realistischen Testumgebungen bieten vielversprechende Ansätze, um die vielseitigen Effekte auf Offshore-Strukturen besser zu verstehen und verlässlichere Modellierungen der hydrodynamischen Lasten zu ermöglichen. Experimente im neu entwickelten Salzwasser-Wellen-Strömungskanal sollen lebenden marinen Bewuchs unter realitätsnahen Bedingungen untersuchen, um die bisherigen Ergebnisse zu erweitern und zu validieren.

## Referenzen

- Aalami Harandi, M.M., Tamimi, V., Zeinoddini, M., Rashki, M.R., Ashrafipour, H., 2024. Effects of soft marine growth on vortex-induced vibration: A comparative analysis with hard marine growth. *Applied Ocean Research* 144, 103906. doi:10.1016/j.apor.2024.103906.
- Baarholm, R., Skaugset, K., 2008. Modelling and Characterization of Artificial Marine Growth, in: Volume 5: Materials Technology; CFD and VIV. ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal. 15.06.2008 - 20.06.2008. ASMEDC, pp. 863–870.
- Bakhtiari, A., Schoefs, F., Ameryoun, H., 2018. A Unified Approach for Estimating of the Drag Coefficient in Offshore Structures in Presence of Bio-Colonization.
- BMWK, 2024. 60 Gigawatt Offshore-Windenergie bis 2037: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie veröffentlicht den Entwurf zur Fortschreibung des Flächenentwicklungsplans, Berlin.
- Bouty, C., Schafhirt, S., Ziegler, L., Muskulus, M., 2017. Lifetime extension for large offshore wind farms: Is it enough to reassess fatigue for selected design positions? *Energy Procedia* 137, 523–530. doi:10.1016/j.egypro.2017.10.381.
- Chung, D., Hutchins, N., Schultz, M.P., Flack, K.A., 2021. Predicting the Drag of Rough Surfaces. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 53 (1), 439–471. doi:10.1146/annurev-fluid-062520-115127. DNV-RP-C205, 2021. Environmental Conditions and Environmental Loads.
- Faltinsen, O.M., 1999. Sea loads on ships and offshore structures, Reprinted. ed. Cambridge University Press, Cambridge, VIII, 328, [6] stron.
- Flack, K.A., Schultz, M.P., 2010. Review of Hydraulic Roughness Scales in the Fully Rough Regime. *Journal of Fluids Engineering* 132 (4). doi:10.1115/1.4001492.
- Henry, P.-Y., Nedrebø, E.L., Myrhaug, D., 2016. Visualisation of the effect of different types of marine growth on cylinders' wake structure in low Re steady flows. *Ocean Engineering* 115, 182–188. doi:10.1016/j.oceaneng.2016.02.023.
- IEC 61400-3-1, 2020. Teil 3-1: Auslegungsanforderungen für gegründete Offshore-Windenergieanlagen.
- Landmann, J., Fröhling, L., Gieschen, R., Buck, B.H., Heasman, K., Scott, N., Smeaton, M., Goseberg, N. Hildebrandt, A., 2021. New system design for the cultivation of extractive species at exposed sites - Part 2: Experimental modelling in waves and currents. *Applied Ocean Research* 113, 102749. doi:10.1016/j.apor.2021.102749.

Maduka, M., Schoefs, F., Thiagarajan, K., Bates, A., 2023. Hydrodynamic effects of biofouling-induced surface roughness – Review and research gaps for shallow water offshore wind energy structures. *Ocean Engineering* 272, 113798.

Marty, A., Schoefs, F., Damblans, G., Facq, J.-V., Gaurier, B., Germain, G., 2022. Experimental study of two kinds of hard marine growth effects on the hydrodynamic behavior of a cylinder submitted to wave and current loading. *Ocean Engineering* 263, 112194. doi:10.1016/j.oceaneng.2022.112194.

Mesel, I. de, Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B., Degraer, S., 2015. Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia* 756 (1), 37–50. doi:10.1007/s10750-014-2157-1.

Morison, J.R., Johnson, J.W., Schaaf, S.A., 1950. The Force Exerted by Surface Waves on Piles. *Petroleum Transactions (AIME)*, 149–154.

Musial, W., Spitsen, P., Beiter, P., Duffy, P., Marquis, M., Cooperman, A., Hammond, R., Shields, M. (Eds.), 2021. *Erneuerbare Energien in Zahlen*, 94 pp.

Sarpkaya, T., 1976. Vortex shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough circular cylinders at high Reynolds numbers.

Sarpkaya, T., 1990. On the Effect of Roughness on Cylinders.

Sun, C., Zhou, T., An, H., Zhu, H., Cheng, L., 2020. Effect of surface roughness heights on circular cylinder wakes, in: *Proceedings of the 22nd Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC2020*. 22nd Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC2020, Brisbane, Australia. The University of Queensland Brisbane, Australia.

Wolfram, J., Naghipour, M., 1999. On the estimation of Morison force coefficients and their predictive accuracy for very rough circular cylinders. *Applied Ocean Research* 21 (6), 311–328. doi:10.1016/S0141-1187(99)00018-8.

Wolfram, J., Theophanatos, A., 1985. The Effects of Marine Fouling on the Fluid Loading of Cylinders: Some Experimental Results, in: *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference, Houston, Texas. 1985-05-06. Offshore Technology Conference.

Ziegler, L., Muskulus, M., 2016. Fatigue reassessment for lifetime extension of offshore wind monopile substructures. *J. Phys.: Conf. Ser.* 753, 92010. doi:10.1088/1742-6596/753/9/092010.



# FernBin

## Ferngesteuertes, koordiniertes Fahren in der Binnenschifffahrt

### Autorenliste

Dr.-Ing. Rupert Henn

DST Duisburg

---

### Einführung

Angesichts aktueller Herausforderungen wie dem Mangel an qualifiziertem nautischen Personal, insbesondere Schiffsführern sowie dem Güterstruktureffekt wächst der Bedarf an innovativen und zukunftsorientierten Lösungen zur Stärkung der Binnenschifffahrt.

Ein Ansatz ist die Fernsteuerung von Schiffen: Dabei steuert der Schiffsführer das Schiff nicht mehr von seinem Steuerstand im Steuerhaus, sondern von einem Fernsteuerstand an Land. Damit kann die Attraktivität des Berufsbilds Binnenschiffskapitän erhöht und mehr Nachwuchskräfte gewonnen werden. Der Schiffsführer arbeitet nicht mehr an Bord, sondern an einem festen Arbeitsort in Wohnortnähe mit familienkompatiblen Arbeitszeiten.

Darüber hinaus soll der Schiffsführer durch eine Reihe von Assistenzsystemen, wie z. B. Bahnregler und Kollisionswarnsystem unterstützt und entlastet werden. Unter Einsatz von leistungsfähigen Assistenzsystemen verschiebt sich die Arbeit vom aktiven Steuern zum Überwachen und es ist denkbar, dass ein Schiffsführer zeitweise mehr als ein Schiff gleichzeitig steuern kann. Denkbar ist auch, dass von einer Reedereizentrale aus viele Schiffe durch eine Gruppe von Schiffsführern ferngesteuert werden. Dabei wäre nicht nur eine Redundanz vorhanden, falls ein fernsteuernder Schiffsführer unerwartet ausfällt, sondern gleichzeitig könnten auch die Kosten signifikant gesenkt werden.

Diese Ansätze wurden in dem Verbundvorhaben FernBin verfolgt. Dabei wurden alle nötigen Komponenten und Voraussetzungen entwickelt, um mit einem ferngesteuerten Binnenschiff die gleiche Transportleistung und Verkehrssicherheit zu erreichen, wie mit konventionell von Bord gesteuerten Schiffen. Damit können zwei übergeordnete Ziele erreicht werden: Der Fachkräftemangel bei Schiffsführern kann entschärft werden, indem einerseits der Beruf des Schiffsführers für junge Menschen wieder attraktiver wird und andererseits durch den Einsatz von

Assistenzsystemen für das Steuern der Schiffe perspektivisch weniger Schiffsführer als Schiffe erforderlich sind. Mit der Fernsteuerung können zudem kleinere Schiffseinheiten wirtschaftlich betrieben werden, mit denen neue Logistikkonzepte realisiert und damit Güterverkehre auf die Wasserstraße verlagert werden können.

Zur Realisierung dieses Vorhabens waren verschiedene Schritte erforderlich. Hierzu gehören zunächst die entsprechenden technischen Ansätze zur Fernsteuerung der Schiffe. Diese umfassen die erforderlichen Sensoren und Aktoren sowie die zugehörigen Schnittstellen, den Fernsteuerstand an Land, das Datenprotokoll zur Gewährleistung einer robusten und sicheren Datenübertragung sowie Assistenzsysteme zur Bahnführung und zur Kollisionswarnung.

Im Weiteren gehört hierzu auch zur Realisierung der Assistenzsysteme die Prognose des Fahrverhaltens anderer Verkehrsteilnehmer, insbesondere in fließenden Gewässern. Dabei sind vor allem die Manövriereigenschaften des Schiffes und das Verhalten der anderen Schiffsführer als zentrale Parameter zu berücksichtigen. Das Ziel ist ein adaptives Navigationssystem, das dynamisch auf den umgebenden Verkehr reagiert und Verkehrsinformationen in Echtzeit verarbeitet. Es unterstützt den fernsteuernden Schiffsführer, indem es den Raumbedarf für die Begegnung von Schiffen prognostiziert, visualisiert und in einem „prädiiktiven Modus“ mögliche Optionen des Schiffsführers anzeigt. Dadurch versetzt es ihn in die Lage, das eigene Schiff in Abhängigkeit des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer sicher und zuverlässig zu navigieren.

Vor dem Hintergrund eines gemischten Verkehrs aus ferngesteuerten, automatisiert fahrenden und konventionellen Schiffen wurde eine Leitstelle realisiert, die über umfassende Informationen über das Verkehrsgeschehen an der Wasserstraße verfügt. Ein Operator in einem Leitstand beobachtet die Situation und kann ggf. lenkend eingreifen. Gleichzeitig bietet die Leitstelle Möglichkeiten zum Sammeln und Austausch von Informationen aus verschiedenen Quellen.

Neben den technischen Entwicklungen sind weitere Voraussetzungen für einen Regelbetrieb zu erfüllen: Zum einen müssen die Schiffsführer für diese neue Arbeitsweise qualifiziert sein und zum anderen müssen die Vorschriften für die Zulassung und den Betrieb von ferngesteuerten Schiffen angepasst werden. Vor diesem Hintergrund sind im Rahmen des Vorhabens FernBin sowohl geeignete Ausbildungs- und Schulungskonzepte zur Fernsteuerung und Vorschläge für die Erweiterung der Prüfungsrichtlinien zu erarbeiten, als auch Änderungsvorschläge für die relevanten Standards und Vorschriften entwickelt worden.

Das Verbundprojekt FernBin wurde von den Partnern DST – Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V., Argonics GmbH, Argonav GmbH,

Bundesanstalt für Wasserbau, Ingenieurbüro Kauppert, in – innovative navigation GmbH, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen (Institut für Regelungstechnik), Universität Duisburg Essen (UDE: Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme, Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik und Lehrstuhl für Mechatronik und Systemdynamik) durchgeführt.

In der geplanten „Forschungsstrategie zum automatisierten Fahren in der Binnenschifffahrt“ ist das ferngesteuerte Fahren ein Zwischenschritt auf dem Weg zum automatisierten Fahren. Viele der Techniken und Komponenten, die hier entwickelt werden, kommen später auch auf einem automatisierten Binnenschiff zum Einsatz. Bei einem völlig autonom fahrenden Binnenschiff könnten in Zukunft die Fernsteuerfunktionen als Rückfallebene auch in eine Notfallzentrale verlagert werden, die bei Systemausfällen oder kritischen Situationen manuell eingreifen könnte.

## 2. Schiff

Alle Forschungsarbeiten und Entwicklungen wurden in diesem Projekt mit dem Gütermotorschiff ERNST KRAMER der Rhenus PartnerShip GmbH & Co. KG durchgeführt. Die Ernst Kramer (Baujahr 1974) hat eine Länge von 105 m, eine Breite von 9,5 m und einen maximalen Tiefgang von 3,2 m. Das Schiff verfügt über einen Propeller, der von einem Dieselmotor direkt angetrieben wird, eine Doppelrudernanlage und eine Bugstrahlanlage, die ebenfalls von einem Dieselmotor direkt angetrieben wird.



Abb. 1: Ernst Kramer im Rhein-Herne-Kanal

Aufgrund des Alters des Schiffs bestand eine Herausforderung darin, das Schiff mit der Automatisierungs- und Fernsteuertechnik auszurüsten. Dass dies gelungen ist,

zeigt gleichzeitig aber auch, dass sich praktisch jedes Bestandsschiff mit vertretbarem Aufwand so nachrüsten lässt, dass es ferngesteuert betrieben werden kann.

Ausgehend von drei Knotenpunkten in Form von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) in Maschinenraum, Steuerstand und Bugstrahlraum, wurde ein redundantes Netzwerk implementiert, an das die Hardwareausrüstung entsprechend angeschlossen wurde. An die SPS wurden alle navigatorisch relevanten Komponenten angeschlossen. An dieses Netzwerk wurden auch die Kommunikationsschnittstellen (Mobilfunkrouter) und alle netzwerkfähigen Sensoren direkt angeschlossen (Kameras, Lidar). Die UKW-Funkgeräte wurden erneuert und verfügen jetzt über eine Netzwerkschnittstelle, so dass der Audio-Stream des UKW-Funk und die Bedienung der Funkgeräte zwischen Bordgerät und Fernsteuerzentrale bidirektional übertragen werden kann.

### 3. Fernsteuerung

Die Fernsteuerung erfolgt von baugleichen Fernsteuerständen vom DST oder der UDE aus. Diese Steuerstände folgen in ihrer Gestaltung der DIN EN 1864. Die Darstellung der Kamerabilder erfolgt beim Fernstand der UDE auf einzelnen Monitoren (s. Abb. 2), beim DST werden die Bilder im Projektionssystem des Versuchs- und Leitungszentrum Autonome Binnenschiffe (VeLABi) auf eine Leinwand projiziert (s. Abb. 3).



Abb. 2:  
Steuerstand in der Universität  
Duisburg-Essen



Abb. 3:  
Steuerstand am DST (VeLABi)

Schiffsseitig wird der Netzzugang über zwei gekoppelte Mobilfunkrouter mit jeweils drei SIM-Karten der drei großen Netzbetreiber Telekom, Vodafone und O2 durchgeführt. Ein Mobilfunkrouter befindet sich im Heck, die sechs zugehörigen Hochleistungsantennen sind auf der Wohnung installiert. Der zweite Mobilfunkrouter befindet sich am Bug, die sechs zugehörigen Hochleistungsantennen sind auf dem Vorschiff installiert. Die gekoppelten Router können so die Mobilfunkkanäle optimal ausnutzen. Durch die Verteilung der Antennen an Heck und Bug können Unterbrechungen der Mobilfunkverbindung bei Brückendurchfahrten verhindert werden.

Zwischen dem Schiff und dem Fernsteuerstand wird eine VPN-Verbindung aufgebaut, die das lokale Netzwerk des Schiffes mit dem des Fernsteuerstands verbindet. Die Verbindung ist nach dem Stand der Technik gegen äußere Angriffe geschützt. Über diese Netzwerkverbindung werden die Kamerastreams vom Schiff zur Fernsteuerzentrale übertragen. Die Übertragung der Steuerbefehle vom Fernsteuerstand zum Schiff und die Statusmeldungen vom Schiff zum Fernsteuerstand erfolgt zwischen den jeweiligen SPS bzw. dem Navigationsrechner an Bord und an Land.

Der Schiffsführer in der Fernsteuerzentrale (im folgenden „Operator“ genannt) kann den Motor, das Ruder und die Bugstrahlanlage steuern. Das Starten des Motors und der Bugstrahlanlage erfolgt z. Zt. noch an Bord. Die Übergabe der Fernsteuerung erfolgt nach einer festen Prozedur: Der Schiffsführer an Bord muss zuerst den Ruder- und Fahrhebel in die Nullstellung bringen und die Fernsteuerung zulassen (Freigabe), dann übernimmt der Operator an Land. Nach der Übergabe wird die Funktionsfähigkeit der Fernsteuerung der Steuer- und Manövrierorgane getestet (Ruder legen, Motor bei kleiner Drehzahl in beiden Richtungen einkuppeln, Bugstrahler). Nach erfolgreichem Abschluss der Tests kann der Operator die Fahrt beginnen.

Die Fernsteuerung ist mit mehreren Sicherheitsstufen ausgestattet: Der Schiffsführer an Bord, bei dem immer die Verantwortung für das Schiff liegt, kann jederzeit die Fernsteuerung beenden und die Steuerung an Bord wieder übernehmen. Er kann dazu auch über die Sprechfunkverbindung vom Operator aufgefordert werden, wenn dieser die Steuerung nicht weiter durchführen kann. Bewegt der Schiffsführer an Bord den Ruderhebel oder den Fahrhebel aus der Nullstellung heraus, übernimmt er automatisch die Steuerung. Im Falle einer technischen Störung in der Fernsteuerungssoftware- oder -hardware, kann der Schiffsführer über einen Not-Aus-Schalter auf der Brücke alle externen Steuerkomponenten von der Motor- und Rudersteuerung galvanisch trennen und so zweifelsfrei die volle Kontrolle über sein Schiff erlangen.

Neben den Kamerabildern werden alle wichtigen Navigationsinformationen (Wendeanzeiger, Ruderlage, Drehzahl, Azimut und Drehzahl des Bugstrahlers) und das Radarbild übertragen. Das Radarbild wird nicht vom Bordgerät abgefilmt, sondern die Radardaten selbst werden auf einen Radarpilot 720° am Fernsteuerstand übertragen. Außerdem wird die Navigationskarte (ECDIS) mit allen AIS-Informationen angezeigt.

Darüber hinaus wird die Qualität der Mobilfunkverbindung angezeigt und durch eine Farbkodierung der Anzeige wird sofort sichtbar, ob die Fernsteuerung stabil läuft, die Fernsteuerung aufgrund geringer Datenrate eingeschränkt ist oder sie komplett deaktiviert (Steuerung an Bord) ist.

#### **4. Leitstelle**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Leitstelle für die Schiffsfernsteuerung konzipiert und aufgebaut. Sie dient in der Art eines VTS-Systems der Überwachung des Schiffsverkehrs entlang der Teststrecke und kann koordinierende Aufgaben erfüllen. In der Leitstelle laufen alle Informationen über den Verkehr auf der betreffenden Wasserstraße zusammen. Zusätzlich kann die Leitstelle unterschiedliche Informationen aus externen Systemen und Modulen darstellen, wie z. B. eine prognostizierte Verkehrssituation oder Warnmeldungen und Alarme. Dazu wurden generische Schnittstellen geschaffen, über die Daten in das VTS-System eingespielt und dort verwaltet und dargestellt werden können.

Über einen integrierten Schiffssimulator ist die Leitstelle auch in der Lage, als Testdatengenerator zum Einsatz zu kommen. Der Simulator bildet das Testschiff und einen Großteil der Onboard-Sensorik, wie Radar, AIS, GPS, Wendeanzeiger und Laserscanner nach. Mit dem Simulator können beliebige Verkehrsszenarien erstellt werden, um z. B. Konfliktsituationen gefahrlos untersuchen zu können.

In der im Projekt aufgebauten Form überwacht die Leitstelle den Verkehr auf Basis der öffentlichen AIS-Daten. Eine Kommunikation mit dem Schiff kann nur über eine Mobilfunkverbindung erfolgen. Für eine UKW-Kommunikation mit dem Schiff würde die Leitstelle ein Netz von UKW-Stationen entlang der Wasserstraßen, die als Relaisstationen dienen, benötigen.

Eine tiefer eingreifende Leitstelle, die sich z. B. in der Reedereizentrale befindet, baut, genauso wie der Fernsteuerstand eine VPN-Verbindung zum Schiff auf. Diese kann als „lesende“ Leitstelle der Überwachung dienen und über übliche Kommunikationskanäle (Telefon, Videokonferenz) Verbindung zu den Operatoren halten. Ein Leitstelle, die aktiv eingreifen kann, muss im rechtlichen Sinne als Fernsteuerstand behandelt werden und wurde aufgrund der weiter unten aufgeführten Gründe deshalb in diesem Projekt nicht realisiert.

## **5. Assistenzsysteme**

Wenngleich durch die Fernsteuerung der Beruf des Binnenschiffkapitäns attraktiver werden soll, zeigt die demographische Entwicklung, dass die Binnenschifffahrt zukünftig mit weniger Personal auskommen muss. Unter Verwendung der Fernsteuerung kann dann Personal eingespart werden, wenn sich an Bord kein Schiffsführer mehr befindet und ein Operator mehr als ein Schiff steuert. Dies ist nur möglich, wenn die Aufgabe des Operators größtenteils in der Überwachung liegt und er nur in Ausnahmefällen eingreifen muss.

Ein grundlegend wichtiges Assistenzsystem ist der Bahnregler argoTrackPilot, bei dessen Einsatz der Schiffsführer/Operator von der ständigen Steuerung des Ruders entlastet wird. Die Aufgabe des Schiffsführers besteht dann in der Überwachung des Verkehrs und der Reaktion auf evtl. Hindernisse. Außerdem obliegt dem Schiffsführer die Überwachung der Bordsysteme und die Einleitung von Maßnahmen bei Störungen.

Grundlage für den Bahnregler ist die geplante Bahn, die das Schiff vom Start zum Zielpunkt fahren soll. Diese Bahn kann vom Schiffsführer im argoTrackPilot manuell eingegeben werden. Es wurden allerdings auch verschiedene Verfahren entwickelt, die Bahn automatisch zu berechnen. Hierbei werden allerdings nur die statischen Gewässerinformationen aus der Navigationskarte und die Verkehrsregeln verwendet. Eine weitreichendere Bahnplanung zur Optimierung des Energieverbrauchs bzw. zur Minimierung der Emissionen wird im laufenden Projekt EcoBin entwickelt.

Für die Überwachung des Verkehrs wurden im Projekt verschiedene Ansätze auf Basis von AIS-Daten verfolgt. Aus historischen Verkehrsdaten wurden – örtlich und

nach Schiffsklassen getrennt – Fahrmuster identifiziert, aus denen sich für den aktuellen Verkehr die Fahrspuren der einzelnen Schiffe prognostizieren lassen und sich daraus Kollisionswahrscheinlichkeiten ableiten lassen. Dieses Kollisionswarnsystem konnte allerdings nur in der Simulation getestet werden, weil im Projekt aus rechtlichen Gründen die geplanten Fahrten auf dem Rhein nicht durchgeführt werden konnten. Die Erprobung der Kollisionswarnsysteme und Ausweichstrategien soll in erprobt werden, sobald die Ernst Kramer eine Zulassung für die Fahrt auf dem Rhein erhalten hat.

## **6. Erprobung und Einsatz**

Um den Steuerstand zu evaluieren, wurden zwei unterschiedliche Probandenstudien durchgeführt. Die Probanden erprobten die Funktionalitäten des Steuerstands; abschließend wurden Fragen in Form einer Online-Befragung und eines Interviews gestellt. In der ersten Probandenstudie steuerten erfahrene Schiffsführer die „Ernst Kramer“ vom Steuerstand aus. Dadurch konnten die Operatoren die Funktionalitäten des Steuerstands direkt testen und bewerten. In der zweiten Probandenstudie wurde angehenden Schiffsführern und Matrosen eine aufgezeichnete Fahrt am Steuerstand gezeigt. Damit erhielten die Auszubildenden als zukünftige Arbeitnehmer im Bereich einen Einblick in den Stand der Wissenschaft der Automatisierung in der Binnenschifffahrt. Teilweise wurde eine Eye-Tracking Brille eingesetzt. Diese Studien ergaben eine sehr positive Akzeptanz für die Fernsteuerung und auch Verbesserungsvorschläge für die Gestaltung des Fernsteuerstands. So wurde beispielsweise der Stream der nach achtern blickenden Kamera ursprünglich auf einem Monitor hinter dem Operator dargestellt, so wie es auf der realen Brücke oder auch in einem Schiffsführungssimulator ist. Dieser Monitor wurde dann nach vorne gesetzt, so dass sich schließlich alle Kamerabilder im Blickfeld voraus befinden.

Die Realerprobungen stellten sich aufgrund der Vorschriftenlage als große Herausforderung dar. Im Gegensatz zum Rechtsverständnis bei der Projektplanung zeigte sich, dass die Erprobung der Fernsteuerung auf dem Rhein nicht zulässig ist. Zur Erfüllung von §1.09 der RheinSchPV genügt es nicht, wenn ein Rudergänger an Bord ist, der alle Vorgaben erfüllt. Die Vorschrift erstreckt sich auch auf jeden zusätzlichen Rudergänger in der Fernsteuerzentrale. Dasselbe gilt gleichermaßen für §1.09 BinSchStrO. Auf den Binnenwasserstraßen war schließlich eine Erprobung mit Sondergenehmigung nach §1.21 BinSchStrO möglich. Diese Sondergenehmigungen mussten allerdings für jede einzelne Testfahrt erteilt werden. Erst nach Projektende ist in der BinSchStrO mit §1.28 eine Möglichkeit geschaffen worden, ferngesteuerte Versuchsfahrten regelmäßig beantragen zu können.



Abb. 4: Testfahrt bei der Nationalen Maritimen Konferenz 2023

In der Realfahrt-Probantenstudie haben acht erfahrene Binnenschiffsführer den Steuerstand im realitätsnahen Betrieb erprobt und bewertet. Die Studie dauerte ca. 3 Stunden pro Teilnehmer und bestand aus einer Einarbeitungsphase (30 min), einer ferngesteuerten Fahrt (105 min) sowie einem Befragungsteil (45 min). Zunächst wurde dem Operator das Fernsteuerungssystem mithilfe von eigens im Projekt entwickelten Schulungsmaterialien erklärt und er in den Ablauf der Studie eingewiesen. Die Schulungsmaterialien enthalten unter anderem Informationen zu den rechtlichen Voraussetzungen der Fernsteuerung, den installierten Kameras an Bord, dem Fernsteuer-Fahrstand und dessen Anzeigekomponenten sowie Hinweise zur Bedienung des Fernsteuerungssystems.

Der praktische Teil der Probandenstudie wurde mit allen Probanden identisch wiederholt: Durchgehen der Checkliste vor der Übernahme, Übernahme durch den Operator, Ablegen, Wenden im Wendebecken, Streckenfahrt im Vinckekanal bis zur Rheinmündung, Übergabe an den Schiffsführer, Wenden auf dem Rhein und Einfahrt in den Vinckekanal, Übernahme durch den Operator, Streckenfahrt im Vinckekanal, Anlegen und schließlich Übergabe an den Schiffsführer (s. Abb. 5). Auch wenn die Streckenfahrt im Vinckekanal sehr kurz (die ursprünglich geplante Weiterfahrt in den Hafencanal war wegen einer kurzfristigen Sperrung nicht möglich) und eine ferngesteuerte Fahrt auf dem Rhein nicht erlaubt war, beinhalteten die Probefahrten viele kritische Komponenten einer ferngesteuerten Fahrt.



Abb. 5: Testgebiet für die Probandenstudie (rotes Gebiet: Fernsteuerung, gelbes Gebiet: Steuerung an Bord)

Das zentrale Ergebnis der Probandenstudie ist, dass zum einen die im Projekt entwickelte Technik für die Fernsteuerung einsatztauglich ist und zum anderen die Fernsteuerung durch einen erfahrenen Schiffsführer nach einer kurzen Schulung und Einarbeitung ohne weiteres sicher erfolgen kann.

Bei der Abschlussdemonstration wurde schließlich auch eine Fahrt im Rhein-Herne-Kanal einschließlich einer Schleusung durchgeführt.

Nach dem erfolgreichen Abschluss des Projekts FernBin strebt die Rhenus PartnerShip GmbH & Co. KG die Erteilung einer Genehmigung für die Erprobung auf dem Rhein durch die Zentralkommission für die Rheinschifffahrt an. Auch soll die hier begonnene Forschung fortgesetzt werden mit dem Ziel, durch die Implementierung der Assistenzfunktionen und Weiterentwicklung der Automatisierungssysteme einen Automatisierungsgrad 3+ zu erreichen, in dem die Rückfallebene der fernsteuernde Operator ist.

# SubseaSlide

## Verschleißbeständige, energieeffiziente und zuverlässige Komponenten für Subsea-Anwendungen

### Autorenliste

Michael Döring	Qsil Ingenieurkeramik, Frankenblick
Andreas Kailer	Fraunhofer IWM, Freiburg
Björn Matthey	Fraunhofer IKTS, Dresden
Steffen Kuntze	Fraunhofer IKTS, Dresden
Caroline Tschirpke	EagleBurgmann Germany GmbH & Co.KG, Wolfratshausen
Frank Schaht	Sulzer Pumpen (Deutschland) GmbH, Bruchsal
Eckhard Schüler	Miba Industrial Bearings Germany Osterode GmbH
Andreas Meudtner	LCP Laser Cut Processing GmbH, Hermsdorf
Robert Böisinger	KSF – Hochschule Furtwangen
Bahman Azarhoushang	KSF – Hochschule Furtwangen

---

### 1. Motivation und Zielstellung

Neue Technologien, insbesondere auch die Elektromobilität, führen zu einem rasant steigenden Bedarf an Ressourcen, deren Versorgungssicherheit aus verschiedenen Gründen immer kritischer wird. Daher gewinnen Technologien enorm an Bedeutung, mit denen Rohstoffe ökonomisch und umweltschonend aus dem Meer gefördert werden können. Eine große Herausforderung ist dabei die Absicherung störungsfreier Abläufe, da durch Stillstand, Wartung und Reparatur mariner Anlagen und Systeme enorme Kosten verursacht werden. Daraus resultiert der dringende Bedarf an Werkstoffen und Komponenten, die unter extremen Bedingungen zuverlässig funktionieren und möglichst nicht gewartet werden müssen.

Schlüsselkomponenten sind in solchen Systemen häufig Lagerungen und dynamische Dichtungen, da diese zusätzlich hohen Reibungs- und Verschleißbeanspruchungen ausgesetzt sind. SiC-gebundene Diamantwerkstoffe sind extrem belastbar und verschleißbeständig. Sie zeigen weder korrosive Schädigungen noch eine nachweisbare zeit- und belastungsabhängige Abnahme der Festigkeit. Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung und Qualifizierung von höchst leistungsfähigen und zuverlässigen Komponenten für Pumpen und anderen Aggregaten für Subsea-Anwendungen. Gleitlager und Gleitringdichtungen sind

Schlüsselkomponenten in Pumpen, die die Zuverlässigkeit und Betriebsdauer von Subsea-Anlagen begrenzen. Es besteht ein beträchtlicher Entwicklungsbedarf für einsatzsichere und langlebige Komponenten, um die Rohstoffförderung aus größeren Meerestiefen leistungsfähiger und sicherer zu machen. Im Rahmen des Projekts sollten extrem verschleiß- und korrosionsbeständige Werkstoffe aus keramisch gebundenem Diamant eingesetzt werden. Daraus wurden die für Subsea-Pumpen benötigten Komponenten entwickelt, gefertigt und erprobt. Durch die enge Kooperation von Industriepartnern und Forschungsinstituten wurde eine zielgerichtete Entwicklung gewährleistet, wobei die Entwicklungskette von den Werkstoff- und Fertigungstechnologien bis zur Systemintegration und -qualifizierung vollständig abgebildet wurde.

Der angestrebte Lösungsweg ist in der nachfolgenden Abb. 1 dargestellt. Nach einer Abstimmung der Anforderungen auf den verschiedenen Ebenen war der Projektverlauf in eine Konzeptphase und eine Umsetzungs- bzw. Evaluierungsphase unterteilt. Hierbei wurden ausgehend von der Systemebene die Anforderungen an die Komponenten und Werkstoffe abgeleitet, sodass in der Konzeptphase die Arbeiten auf allen Ebenen parallel laufen konnten – zunächst auf Basis der definierten Anforderungen und anschließend in der Umsetzungsphase dann auch unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Konzeptphase.

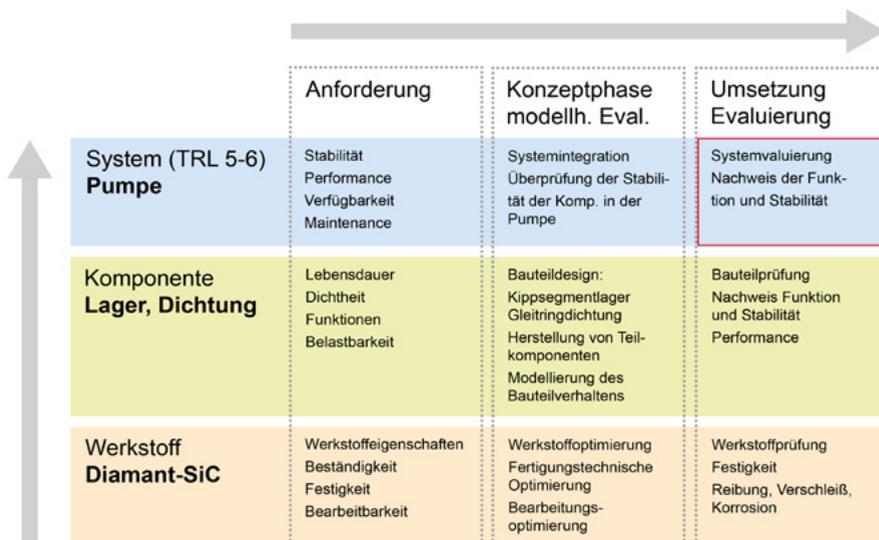


Abb. 1: Darstellung des Lösungsansatzes zur Erreichung des angestrebten TRL 5-6 (entsprechend der Einstufung des Horizon 2020 Work Programme)

In den nachfolgenden Abschnitten sind einige der wichtigsten Ergebnisse dargestellt. Im letzten Kapitel wird eine Einschätzung zum Nutzen der Ergebnisse der Projekts beschrieben und ein Ausblick für weitere Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

## 2. Anpassung der Werkstoffe

Ziele der Arbeiten waren zunächst die Werkstoffoptimierung und Anpassung der SiC-gebundenen Diamantwerkstoffe sowie die Entwicklung von Fertigungsprozessen für Near-Net-Shape Bauteile. Im Rahmen des Projekts war es möglich, Bauteile mit Diamantgehalten bis etwa 60 Vol.-% herzustellen. Abb. 2 zeigt die Mikrostruktur eines solchen Werkstoffs, in dem drei verschiedene Diamant-Körnungen genutzt wurden. Darüber hinaus wurde eine Intarsientechnologie entwickelt, mit der keramische Bauteile aus Siliciumcarbid (SiC) nur lokal an erforderlichen Oberflächen mit Diamant versehen werden, wodurch Rohstoffkosten und auch Kosten für die Bearbeitung der Bauteile erheblich gesenkt werden konnten.

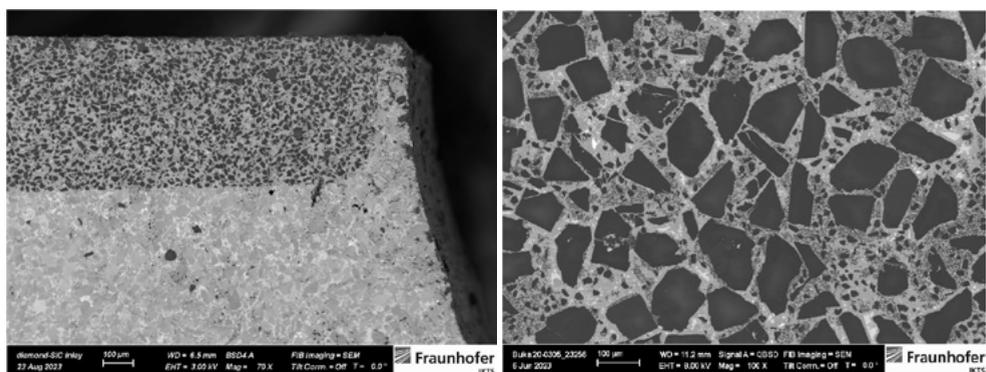


Abb. 2: Mikrostruktur eines Vollmaterials aus Diamant-SiC (links) sowie einer Intarsie mit einer lokalen Diamanteinlagerung (rechts)



Abb. 3: Gleitring mit einer Diamant-SiC-Intarsie (linkes Bild, matter Bereich); Gleitlager-Spurscheibe mit keramischer Gleitfläche aus einer Diamant-SiC-Intarsie (rechtes Bild)

In Abb. 3 sind Beispiele für die im Projekt entwickelten Komponenten zu sehen. Im Rahmen des Projekts ist es gelungen, die Herstellverfahren so zu optimieren, dass eine Endmaßnahe Fertigung bei hoher Werkstoffqualität und Festigkeit möglich ist. Bedarf bestand noch hinsichtlich einer weiteren Verbesserung der Bearbeitbarkeit. Ein Lösungsansatz sind elektroerosiv bearbeitbare Diamant-SiC-Keramiken, wobei durch die Verwendung von Bordotierten Diamanten eine für die Elektroerosivbearbeitung ausreichende elektrische Leitfähigkeit erreicht werden kann.

Im Rahmen des Projekts wurde eine industrielle Fertigungsmöglichkeit der Diamant-SiC Komponenten erreicht. Mit angepassten Prozessparametern können auch große und dickwandige Keramikbauteile gefertigt werden, wie sie für die Herstellung von Gleitlagerscheiben und Hülsen benötigt werden.

### 3. Bearbeitungstechnologien für Diamant-SiC Bauteile

Aufgrund ihrer extremen Härte und Verschleißbeständigkeit sind Diamant-SiC-Keramiken sehr schwierig zu bearbeiten. Bei herkömmlichen Schleifprozessen mit Diamantschleifmitteln ist der Verschleiß inakzeptabel hoch. Im Rahmen des Projekts wurden als Lösungsansatz zunächst das laserunterstützte Schleifen und Schneiden (Trennen) verfolgt. In einer späteren Projektphase wurden außerdem Elektroerosivverfahren erprobt.

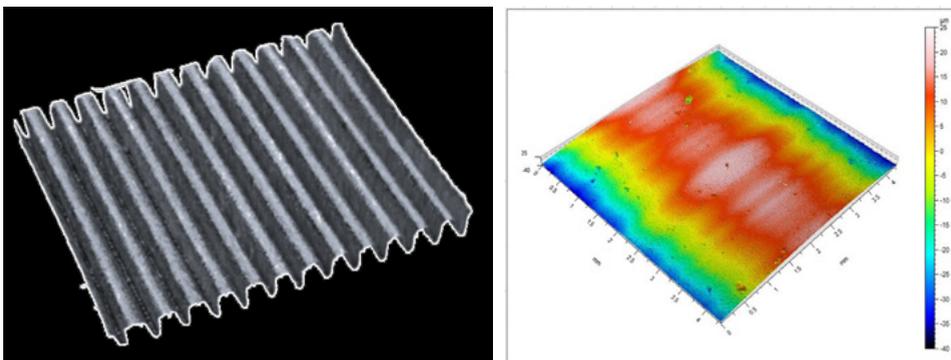


Abb. 4: Beispiel für eine Laservorstrukturierung einer SiC-Diamant-Oberfläche (links) Topografieaufnahme einer Oberfläche nach dem Einstichrundsleifen einer mittels Laser vorstrukturierten Oberfläche.

Untersuchungen mit vielen Parametervariationen und unterschiedlichen Schleifscheiben ergaben, dass sich Diamant-SiC durch hybride Verfahren bearbeiten lässt. Mit laserunterstützter Zerspanung ist es möglich, Kräfte deutlich zu reduzieren und einen guten Abtrag bei geringer Schädigungstiefe und einem akzeptablen Verschleiß der Schleifscheiben zu erzielen. Solche Schleifparameter sind erforderlich, damit die Werkstücke nicht aufgrund hoher Schleifkräfte brechen. Ein verringertes Bruchrisiko und eine höhere Präzision wurden auch durch ange-

passte Haltesysteme (Aufspannungen) für die Bauteile aus Diamant-SiC erreicht. Bearbeitungsversuche mit Drahterosion erwiesen sich unter Kühlschmierung mit Öl als erfolgversprechend. Wenn es gelingt Werkstoffe mit ausreichender elektrischer Leitfähigkeit zu fertigen, sollte dieser Prozess ebenfalls für eine industrielle Umsetzung geeignet sein. Auch das Läppen und Polieren von Diamant-SiC-Oberflächen ist möglich, um die für Gleitringdichtungen erforderlichen hohen Anforderungen an Ebenheit und Rauheit zu erfüllen. Schließlich wurde auch gezeigt, dass mit Laser bzw. Wasserstahl-Laser-Prozessen auch das Treffen von Diamant-SiC-Oberflächen möglich ist und dass beispielsweise auch Nuten und Bohrungen erzeugt werden können.

#### **4. Design und Fertigung von Gleitlagern**

Für die für den Subsea-Bereich entwickelten Pumpen werden Axial- und Radiallager benötigt, die mit Mediensmierung, d.h. stark partikelhaltigen wässrigen Fluiden oder Wasser-Öl-Gemischen betrieben werden können. Ausgehend von der Expertise für ölgeschmierte Kippsegmentlager wurden im Projekt solche Lager entwickelt, deren Gleitflächen durch Diamant-SiC so verstärkt werden, dass sie für mehrere Jahre wartungsfrei, d. h. mit möglichst geringem Verschleiß betrieben werden können. Dazu mussten zunächst Designs entwickelt werden, bei denen anstatt der üblicherweise eingesetzten Stahl- bzw. Kunststoffkomponenten Kippsegmente, Spurscheibe und Wellenhülse aus Diamant-SiC Keramiken eingesetzt werden. Aufgrund des vergleichsweise hohen Bearbeitungsaufwands des diamantverstärkten Werkstoffs sollten dazu insbesondere günstige Herstellgeometrien dieser Bauteile gewählt werden. Weiterhin zu berücksichtigen war der Schutz der metallischen Lagerkomponenten vor partikelinduziertem Verschleiß. Zudem sind die Sprödigkeit, die im Vergleich zu Metall niedrige thermische Ausdehnung sowie die nicht vorhandene plastische Verformbarkeit der Keramik zu beachten. Nach Erstellung und simulativer Überprüfung verschiedener Designs hinsichtlich der Eignung für den geforderten Betriebsbereich wurden Demonstratoren für ein Axial-Kippsegmentlager sowie ein Radiallager konstruiert und gefertigt. Abb. 5 zeigt zwei Varianten des Axiallagers mit diamantkeramischen Kippsegmenten. Der dazu passende Gegenläufer (Spurscheibe) ist in Abb. 3 (rechts) zu sehen. Alle Komponenten, mit Ausnahme der in Abb. 3 dargestellten Spurscheibe wurden für Prüfstandsversuche zur Verfügung gestellt.

Abb. 6 zeigt das Radiallager und die zugehörige Wellenhülse, die mit metallischen Klemmrings (nicht dargestellt) auf der Welle befestigt wird.



Abb. 5: Axiallager mit zwei verschiedenen Segmentvarianten: Trapezförmig (links) und rund (rechts).  
Spurscheibe: s. Abb. 3.



Abb. 6: Radiallager keramischen Kippsegmenten (links) und Wellenhülse aus Diamant-SiC (rechts)

## 5. Evaluierung

### 5.1. Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten

Grundlegende Untersuchungen zum tribologischen Verhalten unter Medien-schmierung wurden zunächst in Modellprüfungen durchgeführt, in denen ein Kippsegment in verkleinertem Maßstab gegen einen entsprechend verkleinerte Spurring getestet wurde (Abb. 7). Ziel war hierbei zu untersuchen, wie das Reibungsverhalten der Diamant-SiC-Werkstoffe von den Belastungsparametern (Gleitgeschwindigkeit, Kontaktdruck, Temperatur) sowie von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt.

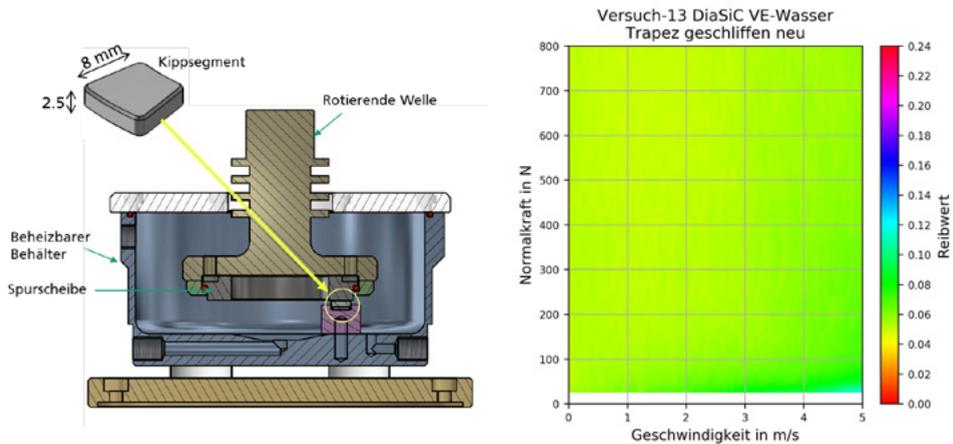


Abb. 7: Prüfaufbau für die Modellprüfung eines Kippsegments gegen einen Spurring (links); repräsentatives Ergebnis einer Prüfung mit einem Kippsegment und einem Spurring aus Diamant-SiC in Wasser bei Raumtemperatur

In einer Reihe von Prüfungen wurde für Diamant-SiC ein außergewöhnlich stabiles Reibungsniveau beobachtet. Wie in Abb. 7 rechts beispielhaft dargestellt ist, ist das Reibungsniveau über den gesamten Beanspruchungsbereich, d. h. bis 5 m/s Gleitgeschwindigkeit und bis 15 MPa (800 N) Flächenpressung, nahezu konstant zwischen 0,04 und 0,06. Darüber hinaus hat sich auch gezeigt, dass sich auch sehr raue (sandgestrahlte) Oberflächen innerhalb kürzester Zeit an dieses Reibniveau anpassen. Durch die Gleitreibungsbeanspruchungen wurden lediglich leichte topografische Veränderungen der Oberflächen beobachtet, wobei keine kritische Schädigungen, z. B. Kornausbrüche zu finden waren. Auch die systemnahe Prüfung von Gleitringdichtungen ergab außerordentlich konstante und stabile Reibwerte, während beim Vergleichsmaterial SiC, das als Standardwerkstoff für Gleitringdichtungen anzusehen ist, wesentlich stärkere Veränderungen und teilweise wesentlich höhere Reibwerte gemessen wurden (Abb. 8). Ausführliche Informationen zum tribologischen Verhalten sind bereits veröffentlicht [1].

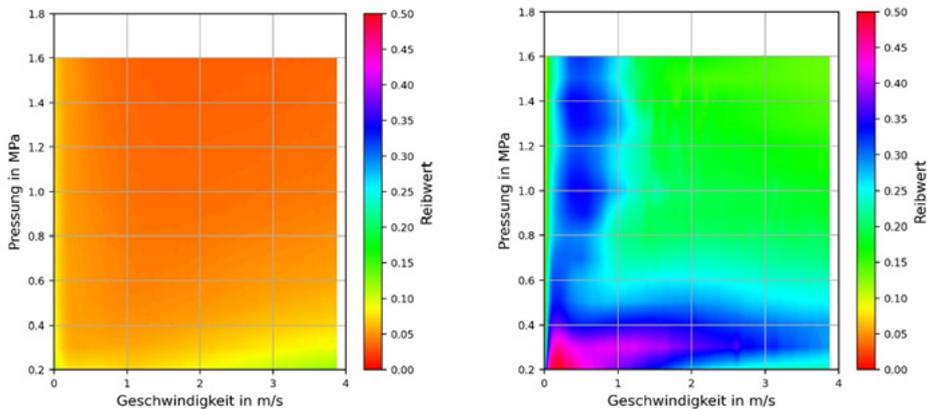


Abb. 8: Friction Maps für Gleitringdichtungen bei anwendungsnaher Prüfung

(Medium: Vollentsalztes Wasser, Raumtemperatur, 2 bar Mediumsdruck).

Links: Daiamant-SiC Selbstpaarung; Rechts: Referenzpaarung aus diamantfreiem SiC

## 5.2. Systemprüfung Mediengeschmierter Gleitlager

Für die anwendungsnaher Prüfung wurde zunächst ein Prüfstand entwickelt und gebaut, der für partikelhaltige Medien ausgelegt ist. Eine solche Prüfung erfordert Drehzahlen bis 4000 U/min bei Axiallagerkräften bis 21 kN. Ein einfacher Umbau des Prüfstands ermöglichte auch die Prüfung der Radiallager, wobei Drehzahlen bis 3000 U/min und Radialkräfte bis 2 kN erreicht werden können. Um eine erhöhte Belastung durch Partikel zu erreichen, wurden Partikelgehalte zwischen 1000 und 10.000 ppm eingestellt. Prüfungen wurden zunächst mit einer Designvariante durchgeführt, bei der noch trapezförmige Gleitpads verwendet wurden. In Abb. 8 ist der Lagerring nach einem Prüflauf zu abgebildet. In der Übersichtsaufnahme deutet bereits die Fleckigkeit der Gleitpads auf stellenweise Veränderungen der Oberfläche hin. Bei weiteren Untersuchungen wurden an den Gleitflächen stellenweise Einglättungen beobachtet. Außerdem waren die Vorderkanten der Gleitpads durch Erosion abgerundet. Weitere kritische Schädigungen gab es an den Keramikkomponenten nicht. Allerdings zeigte sich an den Stahlkomponenten stellenweise deutlicher Verschleiß aufgrund des hohen Partikelgehalts.

Auch das Radiallager (s. Abb. 6) wurde im Rahmen der Prüfstandsversuche mit teilweise sehr hohen Partikelgehalten geprüft. Hierbei ergab sich ein ähnliches Bild: Das Laufverhalten während der Prüfungen war stabil, und die Keramikoberflächen zeigten im Wesentlichen nur geringfügige lokale Veränderungen an den Oberflächen.

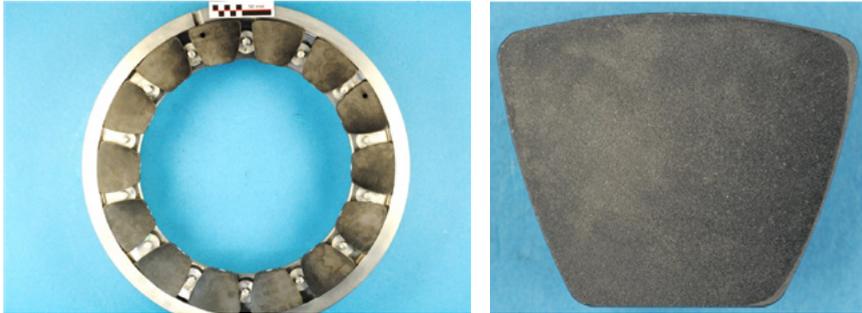


Abb. 9: Makroaufnahmen des Axiallagers (links) und eines einzelnen Gleitpads (rechts) nach der Systemprüfung

### 5.3. Systemprüfung von Gleitringdichtungen

Die tribologischen Anforderungen an Gleitringdichtungen sind sehr hoch, da aufgrund der erforderlichen Dichtfunktion die Menge an Flüssigkeit im Gleitkontakt sehr gering ist und kaum für stabile hydrodynamische Trennung der Oberflächen ausreicht. Mit Diamant-SiC soll ein höchst verschleißbeständiger Werkstoff genutzt werden, der auch unter solchen Mangelschmierungsbedingungen ein langzeitstabiles Betriebsverhalten der Pumpen ermöglicht. Dazu wurden Gleitringdichtungen mit Diamant-SiC-Intarsie (s. Abb. 3) in verschiedenen Geometrien und Einsatzbedingungen erprobt. Darüber hinaus wurden mit einem Laser Nuten in die Gleitfläche eingebracht, die zu einer Verbesserung der Schmierungsbedingungen führen sollten (Abb. 9). Für die Evaluierung der Gleitringdichtungen wurden verschiedenen Prüfstände genutzt (Abb. 10), die die Einsatzbedingungen genau nachbilden können.

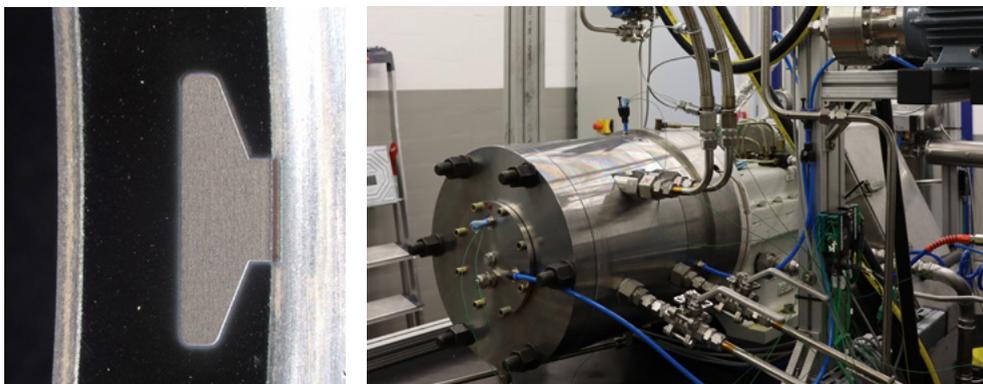


Abb. 10: Links: Aufnahme einer Gleitringoberfläche mit einer Diamant-SiC-Intarsie und einer Schmiernut Rechts: Hochgeschwindigkeits-Prüfstand für die Evaluierung von Gleitring-dichtungen unter sehr hohen Beanspruchungen

Die Prüfungen ergaben teilweise ein vielversprechendes Verhalten, indem die Gleitringdichtungen bis zu sehr hohen Belastungen betrieben werden konnten, ohne Schaden zu nehmen. Allerdings waren teilweise die Gleitflächentemperaturen und die Leckage höher als bei den Referenzversuchen mit Gleitringdichtungen aus SiC. Problematisch waren teilweise auch Langzeitversuche, bei denen nach etwa 500 Stunden die SiC-Anteile abgetragen wurden und dadurch Ausbrüche entstanden sind. Für den Einsatz in Subsea- oder anderen industriellen Anwendungen besteht somit noch Verbesserungsbedarf.

## **6. Fazit und Ausblick**

Im Rahmen des Projekts wurden große Fortschritte und Erkenntnisse hinsichtlich der Entwicklung, Fertigung und Evaluierung von höchst verschleißbeständigen Gleitkomponenten für Subsea-Pumpen erhalten. Diese umfassen:

- Entwicklung und Bereitstellung von angepassten Werkstoffen und einer Intarsientechnologie, mit der diamanthaltige Keramiken lokal auf einem keramischen Grundkörper aufgebracht werden können.
- Laserunterstützte Prozesse sind eine geeignete Möglichkeit, mit der diese Werkstoffe bearbeitet werden können. Auch elektroerosive Prozesse sind ggf. nutzbar. Jedoch ist die Bearbeitungstechnologie noch immer sehr anspruchsvoll. Insbesondere müssen Finishprozesse für Gleitringdichtungen noch weiter verbessert werden, um bei Gleitringdichtungen eine geringere Leckage zu erreichen.
- Es wurden Designs für Radial- und Axial-Kippsegmentlager entwickelt, die sich in der Evaluierung auch unter erhöhten Partikelbelastungen im Fluid bewährt haben. Es sind hier noch Anpassungen erforderlich, um Brüche an den Keramikelementen im Betrieb sicher auszuschließen und die Verschleißbeständigkeit der metallischen Trägerelemente zu verbessern.
- Die Evaluierung der Gleitringdichtungen zeigt, dass mit Intarsien aus Diamant-SiC eine sehr hohe Belastbarkeit erreicht werden kann. Weitere Verbesserungsbedarf besteht hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Stabilität der Keramikkomponenten. Eine geringere Leckage kann durch erreicht werden, wenn es gelingt, die Rauheit der Oberflächen der Diamant-SiC Intarsien noch weiter zu verringern.
- Laborversuche zum tribologischen Verhalten von Diamant-SiC haben gezeigt, dass das Reibungsverhalten auch unter Mangelschmierungsbedingungen außerordentlich stabil ist. Auch die Verschleiß- und Korrosionsbeständig-

keit sind extrem hoch. Somit dieses ist aus werkstofftechnischer Sicht dieses Material ideal für solche tribologischen Beanspruchungen in Subsea-Pumpen geeignet.

- Im Rahmen des Projekts war es nicht mehr möglich, die Langzeitstabilität der Gleitlager und Gleitringdichtungen ausreichend zu überprüfen. Entsprechende Untersuchungen müssen nach Projektende gemacht werden.
- Betreiber von Subsea-Analgen werden sich nur dann überzeugen lassen, solche Komponenten einzusetzen, wenn diese kein erhöhtes Ausfallrisiko und damit Betriebsrisiko darstellen. Dafür müssen noch weitere Anpassungen und Untersuchungen erfolgen.

### **Danksagung**

Das Konsortialprojekt wurde mit finanzieller Unterstützung des BMWK durchgeführt (Förderkennzeichen: 03SX508) und vom Projektträger Jülich, Bereich Meeresforschung, Geowissenschaften, Schiffs- und Meerestechnik, begleitet.



# DigitShip

## Erfassung, Analyse und Verwertung von Betriebsdaten für effiziente und sichere Schiffe

### Autorenliste

**Dr.-Ing. Simon Mewes**

Universität Duisburg-Essen

**Dr.-Ing. Jens Neugebauer**

Universität Duisburg-Essen

**Prof. Dr.-Ing. Florian Sprenger**

Universität Rostock

**Dipl.-Ing. Lutz Kleinsorge**

Mecklenburger Metallguß GmbH

**Hauke Baumfalk, M.Sc.**

Mecklenburger Metallguß GmbH

**Prof. Dr.-Ing. Bettar O. el Moctar**

Universität Duisburg-Essen

---

### 1. Einleitung

In den letzten Jahren konnte ein zunehmender Trend zur Nutzung von Schiffsbetriebsdaten beobachtet werden. Die Aufnahme der Messdaten verschiedener Schiffssysteme wird häufig schon automatisiert durchgeführt. Regularien wie der „Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)“ der „International Maritime Organisation (IMO)“, die „Monitoring, Reporting, and Verification (MRV)“ Regularien der Europäischen Union (EU) oder die Norm 19030 der Internationalen Organisation für Normung (ISO) treiben dies weiter voran. Ende 2022 und Anfang 2023 wurden von der IMO neue Maßnahmen verabschiedet, die das Ziel haben, die Dekarbonisierung der Schifffahrt zügig umzusetzen. Zu nennen sind der „Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)“ und der „Carbon Intensity Indicator (CII)“. Für Schiffseigner machen diese Rahmenbedingungen eine systematische Nutzung von Betriebsdaten und die Analyse von Leistungsparametern unabdingbar, um einen optimalen Betrieb ihrer Schiffe hinsichtlich ökologischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte zu erreichen.

Die automatisierte und kontinuierliche Aufnahme von Messdaten erweitert die im klassischen „Noon-to-Noon“-Bericht der Schiffsführung festgehaltenen Daten deutlich. Die Auswertung von Messdaten bietet ein hohes Potenzial für einen effizienteren, sicheren und umweltfreundlicheren Betrieb von Schiffen. Patey (2019) beschrieb Methoden zur Nutzung der gesammelten Daten für die Verbesserungen von Neubauten und Nachrüstungsprojekten. Von Zhang, et al. (2021) wurden die analysierten Schiffsbetriebsdaten und die Umgebungsbedingungen genutzt, um einen Ansatz zur Bewertung des Kollisionsrisikos zu entwickeln. Liu, et al. (2022) entwickelten eine automatische Identifizierungs- und Analyse-

methode für Eisbrecher, um deren Betrieb in eisbedeckten Gewässern anhand von Betriebsdaten zu unterstützen. Ebenso stellt die Nutzung der Daten zur Verbesserung des Schiffsbetriebes und der Systeme innerhalb des Schiffes einen wichtigen Anwendungsfall dar.

Die Auswertung der Betriebsdaten birgt jedoch zahlreiche Herausforderungen, da das Schiff stochastischen Randbedingungen, wie z. B. Seegang, Wind und Strömung, ausgesetzt ist und die Messsysteme an Bord Messunsicherheiten aufweisen. Zudem liegen die Daten häufig aus unterschiedlichen Quellen, mit unterschiedlichen Abtastraten und mit unterschiedlicher Qualität vor. Daher ist es wichtig, moderne Methoden der Datenwissenschaften und des Maschinellen Lernens einzusetzen (Huang, et al., 2022; Lang, et al., 2022).

Andererseits ermöglichen die Vielzahl unterschiedlicher Messsystemen eine teilweise redundante Messmethodik, um abweichende Zustände zu identifizieren. Über physikalische Zusammenhänge und mittels datengesteuerter Methoden können die vorliegenden Daten aufbereitet werden. Die dann vorliegenden validen Daten ermöglichen eine genaue Bewertung des Betriebes und der „Performance“ eines Schiffes.

Aus diesen Überlegungen leiten sich die Projektziele des Forschungsvorhabens DigitShip ab. Diese umfassen die Aufnahme der Betriebsdaten und Umgebungsdaten aus unterschiedlichen Quellen und die Zusammenführung in einer Datenbank sowie die Entwicklung von Filter- und Validierungsmethoden für die Daten. In dem abgeschlossenen Vorhaben wurden Verfahren zur Vorhersage des Brennstoffverbrauchs weiterentwickelt, die eine Differenzierung nach unterschiedlichen Einflussfaktoren zulassen. Anschließend wurden Empfehlungen für Maßnahmen zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs ausgearbeitet und reale Lastkollektive des Propellers ermittelt. Schließlich wurden repräsentative Betriebsprofile ermittelt, die für Neubau- und Nachrüstungsprojekte verwendet werden können.

## **2. Ausgewählte Projektergebnisse**

### **2.1 Langzeitmessungen**

Dem Forschungsvorhaben stand ein 14.000TEU Containerschiff für Langzeitmessungen zur Verfügung. Das Schiff hat eine Gesamtlänge von etwa 360 m, eine Breite von etwas über 50 m und einen Entwurfstiefgang von 14 m. Im Rahmen von „Slow Steaming“ erhielt das Schiff einen neuen Bugwulst und einen neuen Propeller. Die Hauptmaschinenleistung wurde entsprechend verringert. Zu Beginn des Projektes wurde ein Messkonzept entwickelt und umgesetzt.

Während des untersuchten Zeitraums von zwei Jahren fuhr das Schiff auf zwei Routen. Im ersten Jahr lief das Schiff Häfen in Europa und Asien an und änderte dann seinen Dienst, um im zweiten Jahr zwischen Asien und Amerika zu verkehren. An Bord des Schiffes befinden sich zahlreiche Sensoren, die die Navigations-, Maschinen- und Tankdaten des Schiffes erfassen. Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts eine Inertiale Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) eingebaut, um die Schiffsbewegungen präzise zu messen. Kontinuierlich aufgenommene Borddaten wurden gemeinsam mit den „Noon-to-Noon“-Berichten, den Ladungszuständen und den Wetterdaten in ein Datenbankmodell eingepflegt. Die „Noon-to-Noon“-Berichte wurden jedoch nicht nur einmal täglich, sondern auch ereignisbasiert geschrieben. Die Wetter- und Umweltdaten wurden von einem externen Wetterdienst bereitgestellt. Außerdem wurden Referenzdaten aus dem Schiffsentwurf in die Datenbank eingepflegt. Abbildung 1 zeigt die Visualisierung dieser Datenströme in die Datenbank.

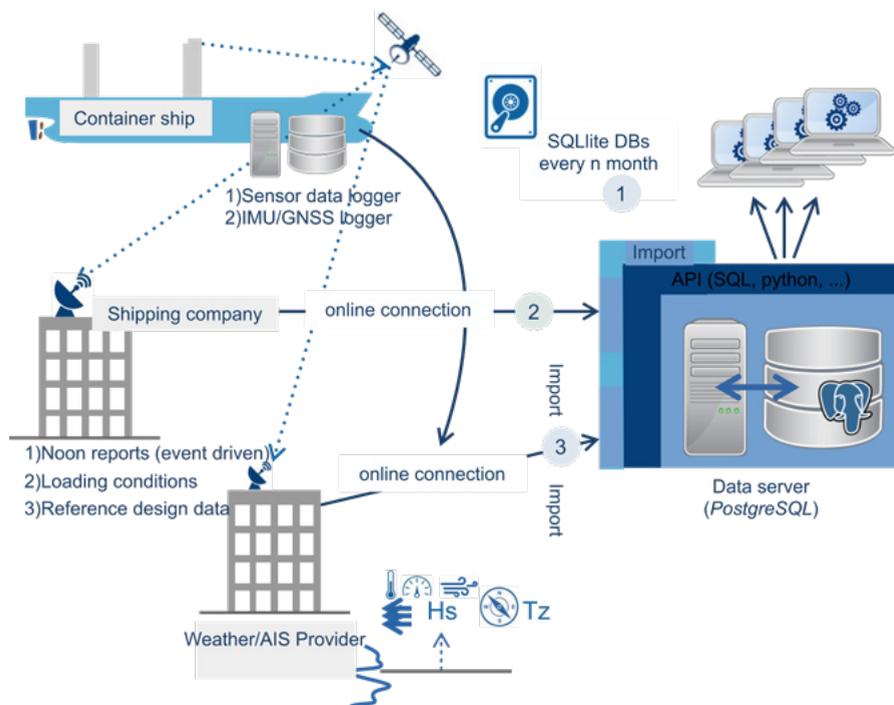


Abb. 1: Visualisierung der unterschiedlichen Datenströme (Jabary, et al., 2022).

Diese Betriebsdaten standen dem Konsortium in unterschiedlichen Formaten und Abtastfrequenzen zur Verfügung. Um sämtliche Datenquellen konsistent nutzen zu können, wurde eine Datenverarbeitungseinheit entwickelt, die in Abbildung 2 dargestellt ist.

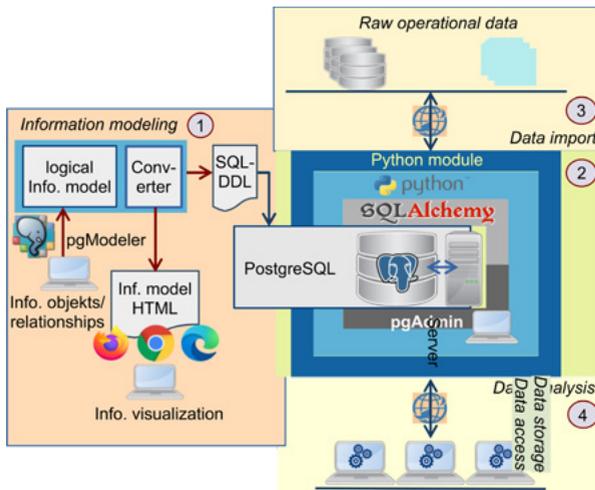


Abb. 2:  
Datenverarbeitungseinheit  
(Jabary, et al., 2023).

Die vier Hauptkomponenten dieses Datenverarbeitungsmodells werden im Folgenden dargestellt:

- Informationsmodell: Diese Komponente ermöglicht die Darstellung der Betriebsdaten als Objekte mit Beziehungen untereinander als logisches Informationsmodell. Hierzu wurde die Software pgModeler (Araujo e Silva, 2023) genutzt. Das Modell ermöglicht die Nutzung verschiedener Ausgabeformate. Im Rahmen des Projekts wurde das Format „SQL DDL“ genutzt, da dies eine Einbindung in das Datenbankmanagementsystem PostgreSQL (2023) ermöglicht.
- Datenspeicherung und -zugriff: Die Speicherung und der Zugriff auf die Daten erfolgt mittels des PostgreSQL Datenbankmanagementsystems. Zur Vereinfachung des Datenzugriffs wurde ein physikalisches objektorientiertes Modell in Python erstellt.
- Datenimport: Die Rohdaten unterschiedlicher Quellen, Formate und Abtastraten werden regelmäßig importiert, eingefügt und synchronisiert. Speziell entwickelte Skripte dienen der Erleichterung des Imports.
- Datenvorbehandlung und -analysen: Das objektorientierte Zugriffsmodell ermöglicht eine effiziente Weiterverarbeitung und Analyse der Daten.

## 2.2 Datenanalysen

Zunächst wurden die Messdaten aufbereitet und auf Validität untersucht. Die Herausforderungen bei der Weiterverarbeitung der Rohdaten lassen sich grob in zwei Kategorien aufteilen:

- Die Datenform: Verschiedene Formate, Quellen und Abstraten führen zu Herausforderungen bei der Synchronisierung und gemeinsamen und integrierten Verarbeitung. Diese Herausforderungen wurden mittels des zuvor beschriebenen Informationsmodells adressiert.
- Der Dateninhalt: Hierbei geht es insbesondere um den Umgang mit fehlenden Daten durch Sensorausfall, Übertragungs- oder Bedienfehler und um nicht-physikalische Ausreißer.

Um den genannten Herausforderungen begegnen zu können, wurde eine Vorverarbeitungsstrategie für Schiffsbetriebsdaten entwickelt. Zunächst erfolgte eine Analyse der Daten hinsichtlich des Inhalts, wobei fehlende Daten, Nullen und Ausreißer im Fokus standen. Die einfachste Möglichkeit, Datenlücken zu behandeln, besteht darin, bei fehlenden Werten den gesamten Datensatz zu ignorieren und die Datenanalyse mit den verbliebenden Daten durchzuführen. Bei dieser listenweisen Löschung verliert jedoch die Auswertung an statistischer Aussagekraft. Raaijmakers (1999) hat herausgefunden, dass eine listenweise Löschung der Daten die Aussagekraft um 35 % reduziert, wenn nur 10 % der Daten fehlen, und um 98 %, wenn 30 % der Daten fehlerhaft sind. Moderne Imputationsmethoden, wie Mittelwert-Imputation oder Regression, erhalten die statistischen Eigenschaften der Daten auch noch bei bis zu 40 % fehlerhaften Daten (Lodder, 2014). Im Rahmen von DigitShip (Jabary, et al., 2023) wurden verschiedene Imputationsmethoden getestet und ihre Ergebnisse miteinander verglichen. Diese Methoden umfassten die Mittelwert-Imputation, die lineare Regression und die KNN (K-Nearest Neighbor) Imputation. In dem Beispiel wurde der Brennstoffverbrauch analysiert und es konnte gezeigt werden, dass für diesen Fall die lineare Regression zum Ziel führt. Die Auswahl der besten Methode ist jedoch nicht immer klar und ersichtlich.

Die Datenanalyse setzte im Anschluss an die anfängliche Aufbereitung der Betriebsdaten an. Bei der Analyse geht es zunächst hauptsächlich darum, den Betriebsprozess zu verstehen und die Hauptfaktoren zu finden, die die Leistung des Schiffes beeinflussen. Im Folgenden geht es um die Leistungsanalyse basierend auf der ISO-Norm 19030 ebenso wie die Korrelation und die Abhängigkeiten unterschiedlicher Betriebsdaten.

### **Datenfilterung nach ISO-Norm 19030**

Das Hauptziel der ISO-Norm 19030 (International Organization for Standardization, 2016) besteht in der Erfassung von Veränderungen der Leistungsindikatoren für den Rumpf- und Propeller. Es werden Leistungsindikatoren abgeleitet, die einen Vergleich mit Referenzkurven ermöglichen. Dies können Werte aus Modellversuchen oder der Probefahrt sein, aber auch Vorhersagen aus Simulationen mittels numerischer Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics, CFD). Um Ausreißer auszuschließen, können die Daten anhand verschiedener Ansätze

korrigiert und gefiltert werden. Diese Ansätze basieren zum Beispiel auf statistischen oder physikalischen Methoden. Die validen Datensätze können weiterverwendet werden, um statistische Werte verschiedener Zeitabschnitte zu vergleichen und so Hinweise für die Leistungsentwicklung des Schiffes zu finden. Die Filter- und Korrekturverfahren, die in der ISO 19030 beschrieben werden, wurden als Modul in das zuvor vorgestellte Schiffsbetriebsdatenverarbeitungssystem implementiert.

Für die Auswertung wurde eine Zeitspanne von 50 Wochen mit einer Abtastrate von einer Sekunde ausgewählt. Weiterhin wurden die Daten in einzelne Wochen segmentiert, um den Bedarf an Arbeitsspeicher während der Datenanalyse zu minimieren. Insgesamt wurden etwa 16 Mio. Datenpunkte ausgewertet. Zum Vergleich der Betriebsdaten mit den Referenzdaten wurde die erforderliche Antriebsleistung bei verschiedenen Tiefgängen und Geschwindigkeiten ermittelt. Die Referenzdaten wurden mittels RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) Simulationen für den Glattwasserwiderstand bei verschiedenen Tiefgängen berechnet und durch einige wenige Propulsionssimulationen für bestimmte Geschwindigkeiten erweitert. Diese Simulationsergebnisse wurden zusammengefügt, um ein möglichst breites Spektrum an Leistungsprognosen für den Schiffsbetrieb abzudecken.

Nach der ISO-Norm wird ein Zweischnitt-Ansatz zur Filterung empfohlen. Zunächst wurden die Daten daher in Blöcken mit gleicher Zeitspanne (hier zu je einer Stunde) zusammengefasst. Das Chauvenet-Kriterium wurde dann zur Detektion von Ausreißern im betrachteten Intervall angewandt. Weiterhin wurden die Datenblöcke hinsichtlich der statistischen Werte, Mittelwert und Standardabweichung, geprüft. Wenn diese Werte bestimmte Kriterien nicht erfüllten, wurden die Datenblöcke aussortiert. Anschließend wurde die gemessene Maschinenleistung mithilfe des Ansatzes von Blendermann (1993) im Hinblick auf den Windeinfluss korrigiert. Nun konnten die Datenpunkte hinsichtlich folgender Kriterien gefiltert werden:

- Wassertiefe
- Windgeschwindigkeit
- Schiffgeschwindigkeit (darf nicht mehr als  $\pm 5\%$  vom Referenzwert abweichen)
- Tiefgang (darf nicht mehr als  $\pm 5\%$  vom Referenzwert abweichen)

Nach dem ersten Schritt der Detektion von Ausreißern mittels des Chauvenet-Kriteriums und der Überprüfung der statistischen Werte blieben noch 92 % der

Daten übrig. Der zweite Schritt führte zu einer Reduktion auf 77% nach der Überprüfung der Wassertiefe und 27% nach der Überprüfung der Windgeschwindigkeit. Das Kriterium der Schiffsgeschwindigkeit und des Tiefgangs hat nur einen sehr geringen Einfluss, da die Referenzkurven nach den Betriebsbedingungen ausgerichtet wurden.

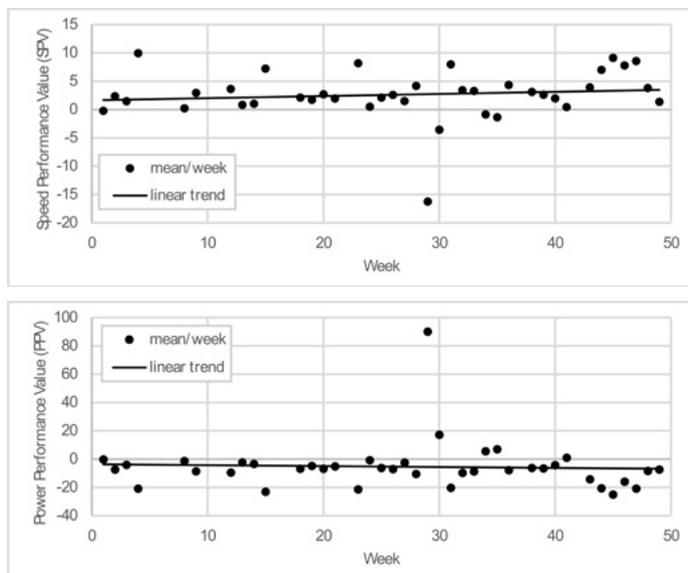


Abb. 3: Geschwindigkeits- (oben) und Leistungsindikatoren (unten) nach ISO 19030 für eine Zeitspanne von 50 Wochen, (Jabary et al., 2023).

Im letzten Schritt wurde die erforderliche Antriebsleistung ermittelt. Für den jeweiligen Tiefgang wurde die am nächsten liegende Referenzkurve ausgewählt. Geschwindigkeit und Maschinenleistung wurden über die Admiraltätsformel korrigiert und die Leistungsindikatoren wurden ermittelt. Die Mittelwerte der Indikatoren jeder Woche sind für die Geschwindigkeit und die Maschinenleistung in Abbildung 3 dargestellt. Aus den positiven Indikatoren für die Geschwindigkeit und den negativen Indikatoren für die Maschinenleistung geht hervor, dass das Schiff performanter ist als durch die Referenzdaten vorhergesagt. Die leichte Verbesserung der Performance des Schiffes, welche die Indikatoren anzeigen, liegt daran, dass das Schiff im Betrieb über den Zeitraum kontinuierlich seine Geschwindigkeit reduziert und die Prognoseungenauigkeit mit den kleineren Geschwindigkeit steigt.

### Korrelationen der Betriebsdaten

Die Korrelationen und Abhängigkeiten der verschiedenen Parameter werden durch einige Beispiele erläutert. Diese Beispiele umfassen den Gesamtkraftstoffverbrauch des Schiffes („Total FOC“ – Total Fuel Oil Consumption) und den Gesamtverbrauch der Hauptmaschine („FOC ME“ – Fuel Oil Consumption Main

Engine). Dabei werden die Navigations- und Umgebungsparameter aus den Daten der neun Europa-Asien Reisen des Schiffes hinsichtlich ihres Einflusses auf die Verbräuche untersucht.

Zur Korrelationsanalyse wurden folgende Methoden verwendet:

- Pearsons Korrelation: Laut Sedgwick (2012) können mithilfe der Pearson Korrelation ausschließlich lineare Abhängigkeiten zwischen zwei Variablen quantifiziert werden. Dabei nimmt der Korrelationskoeffizient Werte im Bereich  $[-1,1]$  an. Wenn der Wert genau  $-1$  oder  $+1$  ist, dann hängen die Parameter genau linear voneinander ab. Wobei die Werte  $-1$  antiproportional and  $+1$  proportional bedeuten.
- Spearman'sche Rangkorrelation: Mit dieser Korrelationsmethode ist das Aufzeigen monotoner Verhältnisse zweier gemessener Parameter möglich (Zar, 2005). Hier liegt der Korrelationskoeffizient ebenfalls zwischen  $[-1,1]$ . Bei strikt proportionalem Verhalten, d.h. wenn der Wert von Parameter A steigt bzw. fällt, wenn der Wert von Parameter B genauso steigt bzw. fällt, nimmt der Koeffizient den Wert  $+1$  an. Bei antiproportionalem Verhalten wird hingegen der Wert  $-1$  ausgegeben. Während Pearsons Methode mit linearen Abhängigkeiten arbeitet, funktioniert Spearmans Ansatz für monotone Abhängigkeiten.
- Distanzkorrelation: Wie von Lyons (2013) aufgezeigt, ist es mit dem Ansatz der Distanzkorrelation möglich, sowohl das lineare als auch das nicht-lineare Verhältnis zwischen zwei Parametern zu quantifizieren. Der Korrelationskoeffizient nimmt Werte zwischen  $[0,1]$  an. Wobei der Wert  $0$  bedeutet, dass die Parameter unabhängig voneinander sind, und der Wert  $1$  bedeutet, dass der Teilraum der betrachteten Parameter gleich ist.

Die aufgezählten Methoden erlauben das Ermitteln und die Analyse unterschiedlicher Arten von Korrelationen und Abhängigkeiten in Schiffsbetriebsdaten. Sie ermöglichen ebenfalls die Bewertung der unterschiedlichen Imputationsmethoden. Außerdem führen diese Methoden zu einem tieferen Verständnis des Schiffbetriebes und zu möglichen Empfehlungen zur Optimierung.

### **Anwendungsbeispiel**

Im Folgenden wurde ein beispielhafter Datensatz ausgewählt, um die Korrelationsanalyse der Betriebsdaten für „Total FOC“ und „FOC ME“ zu veranschaulichen. Abbildung 4 zeigt die Abhängigkeiten der Verbrauchsparameter von ausgewählten Wetter- und Navigationsdaten aus den „Noon-to-Noon“-Berichten. Die Abtastrate variiert hier zwischen wenigen Minuten und 24 Stunden (niederfrequent). Einige Wetterdaten der „Noon-to-Noon“-Berichte werden von der Besatzung direkt

eingetragen, andere Daten kommen von einem externen Wetterdienstleister. Dieser wird als „Prov.“ in den Daten gekennzeichnet.

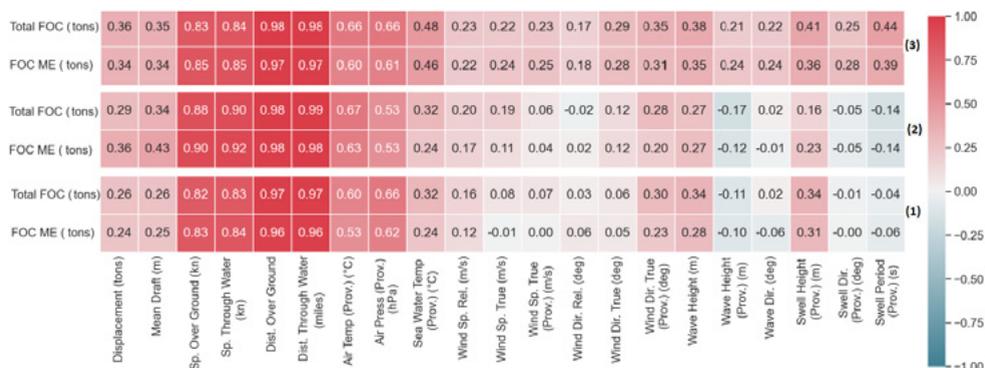


Abb. 4: Korrelationsmatrizen für Daten mit geringer Abtastrate. (1) zeigt die Korrelationsmatrix nach Pearson, (2) nach Spearman und (3) die Distanzkorrelation, (Jabary et al., 2023).

Wie zu erwarten war, zeigen die Koeffizienten für die zurückgelegte Strecke und die Schiffsgeschwindigkeit eine starke Korrelation mit dem Verbrauch des Schiffes und der Hauptmaschine. Der Kraftstoffverbrauch steigt proportional zu der zurückgelegten Strecke und den Geschwindigkeiten.

Die eingegebenen Winddaten (Geschwindigkeit und Richtung) der Besatzung zeigen eine geringe Korrelation mit dem Verbrauch (0,01-0,29), während die entsprechenden Daten des Wetterdiensts Koeffizienten bis zu 0,35 liefern. Die Daten zu Windsee und Dünung zeigen signifikante Unterschiede in ihrer Korrelation. Die durch die Besatzung erhobenen Daten offenbaren einen Anstieg des Verbrauchs für höhere Wellenhöhen. Bei den Daten des externen Wetterdiensts reduziert sich jedoch der Kraftstoffverbrauch bei größeren Windwellen. Die größere Dünung führt wiederum zu erhöhtem Verbrauch.

Die verwendeten Daten stammen alle aus einer Europa-Asien Reise im Frühling zwischen Mai und Juni. Zu dieser Jahreszeit sind Wellen und Wind schwächer als im Herbst und Winter. Daher ist es wichtig, diese Korrelationsanalysen auf weitere Datensätze auszuweiten, um ein vollständiges Bild der Abhängigkeiten zu erhalten. Dennoch zeigen die Beispiele die Möglichkeiten der Methoden des Maschinellen Lernens im Hinblick auf die Analyse von Schiffsbetriebsdaten. Zusätzliche Beispiele für Korrelationsanalysen mit Daten, die mit höheren Abtastraten gewonnen wurden, finden sich in Jabary, et al. (2023).

### **2.3 Prognose des Leistungsbedarfs**

Es gibt viele Methoden, den Leistungsbedarf und damit den Kraftstoffverbrauch eines Schiffes zu prognostizieren. Als erstes wären empirische Methoden zu nennen, die mit physikalischen Komponenten kombiniert werden können. In Verbindung mit Motordiagrammen können diese Methoden dann genutzt werden, um die Maschinenleistung und den Kraftstoffverbrauch vorherzusagen. Außerdem gibt es datengestützte Methoden, wie z. B. Künstliche Neuronale Netze (Artificial Neural Networks, ANN). Diese Methoden können für die gleichen Zwecke angewendet werden, sofern genügend Leistungsparameter des Schiffes zur Verfügung stehen.

#### **Datengestützte Methode**

Wie in den vorherigen Abschnitten bereits erwähnt, wurden umfassende Daten aufgezeichnet. Einige der Datensätze sind redundant oder stark voneinander abhängig. Die Tankfüllstände und die Containerbeladung werden z. B. durch Verdrängung bzw. Tiefgang und Trimm repräsentiert. Ebenso ist der Wind als Geschwindigkeit und Richtung über Bordmessungen, aber auch vom Wetterdienst bekannt. Für die weitere Verarbeitung der Daten war es daher nützlich, die Merkmale zu reduzieren. Nach der Reduktion der Merkmale blieben ein Satz von 23 Prädiktoren sowie die Hauptmaschinenleistung als Rückantwort übrig. Im Anschluss wurde die lineare Abhängigkeit der Merkmale anhand des Pearson-Korrelationskoeffizienten untersucht. Starke Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen konnten so ausgeschlossen werden.

Die Prädiktoren wurden mithilfe einer Normalisierungsschicht für ANN normalisiert. Zur Leistungsvorhersage wurde ein einfaches Feed Forward Neural Network (FFNN) angewendet. Das Netz besteht aus einer Eingabeschicht mit 23 Merkmalen, mehreren Dichteschichten und einer Ausgabeschicht mit einem Ausgabeparameter. Die optimalen Hyperparameter wurden durch eine Rastersuche (grid search) bestimmt.

Die Modelle wurden mit ungefähr einer Millionen Datenpunkten trainiert, um ein Jahr an Daten abzudecken. Der Optimierungsalgorithmus Adaptive Moment Estimation (ADAM) wurde verwendet ebenso wie die Aktivierungsfunktion Rectified Linear Unit (ReLU) für die Neuronen. Die vorhergesagte Maschinenleistung erzielte eine hohe Genauigkeit. Die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers lieferte einen Wert von 464,88 kW und damit einen Fehler von 1,03 % der maximalen Maschinenleistung. Die Genauigkeit des Modells ist bei Werten über 35 MW hoch und nimmt unterhalb von 35 MW mit der Maschinenleistung ab. Für den Vergleich wurden Testdaten für eine 17-tägige Route aus dem Trainingsdatensatz entfernt. Diese Route verläuft von Nordafrika durch das Mittelmeer, den Suezkanal, den Indischen Ozean bis nach China. Die Daten wurden mit

dem Ergebnis eines physikbasierten Modells verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

### Physikbasiertes Modell

Das physikbasierte Modell setzt auf CFD-Berechnungen, Modellversuchsdaten (Experimental Fluid Dynamics, EFD) und ergänzt diese durch empirische Verfahren. Als erstes erfolgt eine Abfrage wichtiger Navigations- und Ladungsdaten aus der Betriebsdatenbank (siehe oben). Im Anschluss werden aus den Referenzdaten des Schiffes weitere Geometriedaten, wie z. B. Blockkoeffizient, Länge der Wasserlinie, benetzte Oberfläche, usw. berechnet. Mit diesen ladungs- und schiffspezi-fischen Daten, den Umgebungsbedingungen und den navigatorischen Daten kann nun der Gesamtwiderstand berechnet werden. Der Gesamtwiderstand besteht aus verschiedenen Komponenten, die modular erweitert werden können. Der Glattwasserwiderstand  $R_{GW}$  wird dabei durch Zusatzwiderstände infolge des Seegangs  $R_{WAVE}$ , Wind  $R_{WIND}$ , Flachwasser  $R_{SW}$ , Drift  $R_D$  und weitere Anteile komplettiert.

$$R_T = R_{GW} + R_{WAVE} + R_{WIND} + R_{SW} + R_D + \dots \quad (1)$$

Der so entstandene Gesamtwiderstand wird dann weiterverwendet, um die Propellerdrehleistung  $P_D$  und schließlich die Bremsleistung  $P_B$  zu bestimmen. Hier wurden weitere CFD-Berechnungen durchgeführt, um den Gütegrad der Propulsion  $\eta_D$  abzuschätzen.

$$P_D = \frac{R_T v_s}{\eta_D} \quad \text{wobei } \eta_D = \eta_0 \eta_H \eta_R \quad (2)$$

Der Gütegrad der Propulsion setzt sich aus dem Propellerwirkungsgrad  $\eta_0$ , dem Schiffseinflussgrad  $\eta_H$  und dem Gütegrad der Anordnung  $\eta_R$  zusammen. Der fehlende mechanische Wirkungsgrad  $\eta_M$  wird abgeschätzt.

$$P_B = \frac{P_D}{\eta_M} \quad (3)$$

Die CFD-Berechnungen wurden für die statistisch häufigsten Betriebszustände (Geschwindigkeit, Tiefgang, Trimm) durchgeführt. Zum Beispiel wurden für den Glattwasserwiderstand vier Tiefgänge, fünf Trimmwinkel und fünf Geschwindigkeiten mittels RANS-basierten CFD-Simulationen berechnet. Die Ergebnisse dieser etwa 100 Berechnungen wurden für die Vorhersage verwendet. Außerdem wurden CFD-Berechnungen für den Zusatzwiderstand in Wellen, Wind, Flachwasser und während Manövriervorgängen durchgeführt. Als RANS-Löser wurde die Software STAR-CCM+ eingesetzt. Weiterhin wurden empirische Verfahren verwendet. Das semi-empirische Verfahren zur Berechnung des Zusatzwiderstandes im Seegang wurde von Liu & Papanikolaou (2020) entwickelt, durch Wang, et al. (2021) validiert

und in die Empfehlungen der ITTC (International Towing Tank Conference) aufgenommen (ITTC, 2021). Hierbei wird jedes zweidimensionale Wellenspektrum, z. B. JONSWAP, in Kombination mit einem Cosinus<sup>2</sup>-Richtungsspektrum als Grundlage genutzt.

Der Flachwasserzusatzwiderstand wurde ebenfalls über ein empirisches Verfahren ermittelt. Dieses Verfahren wurde von Raven (2016, 2019) entwickelt und von der ITTC übernommen. Raven konstatiert explizit, dass sein Ansatz nicht für große Seeschiffe validiert wurde. Jedoch konnte im Rahmen des Projektes für verschiedene Tiefgangs- zu Wassertiefenverhältnisse eine gute Übereinstimmung mit den CFD-Berechnungen erzielt werden. Abweichungen sind lediglich bei der dynamischen Absenkung und dem Trimm ersichtlich. Das Ergebnis für eine 17-tägige Etappe auf einer Reise von Europa nach Asien ist in Abbildung 5 dargestellt.

### Vergleich der Ergebnisse

Die Hauptmaschinenleistung wurde von dem physikbasierten Modell generell etwas geringer (im Mittel etwa 8 % als die Messung) prognostiziert. Da Widerstandskomponenten wie Bewuchs und Zustand der Außenhülle nicht berücksichtigt wurden, war diese Beobachtung zu erwarten.

Die Ergebnisse des datengestützten Ansatzes weichen für die ausgewählte Etappe um etwa 2,5 % vom gemessenen Wert ab. Bei fehlenden Wetterdaten vom Wetterdienstleister konnte eine Vorhersage nur für das datengestützte Modell erzielt werden. Waren ausreichend Daten vorhanden, ließen sich genauere und schnellere Vorhersagen mittels des datengestützten Modells erzielen. Jedoch fehlt hier das Wissen über die Größe der einzelnen Widerstandsanteile und damit die Ursache für den erhöhten oder verringerten Kraftstoffverbrauch.

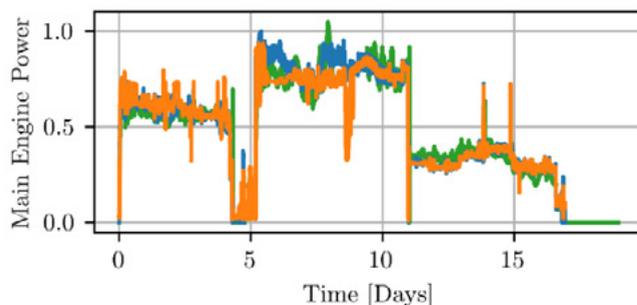


Abb. 5: Berechnete und gemessene Hauptmaschinenleistung. Die Werte wurden mit der maximal gemessenen Leistung normiert. In Blau ist die gemessene Leistung, in Orange die durch FFNN und in Grün die mit dem physikbasierten Modell ermittelten Maschinenleistung dargestellt (Jabary et al., 2023).

### **3. Zusammenfassung**

Im Verbundvorhaben DigitShip wurden datengestützte und physikbasierte Analyse- und Vorhersagemodelle für den realistischen Schiffsbetrieb entwickelt. Hierfür wurden fortlaufende umfangreiche Messungen an Bord eines 14.000 TEU Containerschiffes durchgeführt. Für die Analyse der Daten wurden diese in ein speziell entwickeltes Datenmodell überführt, so dass die Filterung und Auswertung nach verschiedenen Methoden ermöglicht wurden. Die Validierung der Daten wurde durch CFD-Analysen der Propulsion unterstützt. Die Filterung nach validen Daten gemäß ISO 19030 bestätigt, dass ein Großteil der Datensätze aufgrund statistischer Ausreißer oder physikalischer Randbedingungen aussortiert wird. Hier könnten geeignete Imputationsalgorithmen für die Bereitstellung einer breiten Datenbasis mit entsprechend erhöhter statistischer Aussagekraft genutzt werden. Es zeigt sich, dass Datenmodelle, z. B. durch KI-Methoden, bei ausreichenden Trainingsdaten gute Prognosen liefern. Das physikalische Modell unterschätzt den Leistungsbedarf des Schiffes leicht, hat aber gerade bei kleineren Datensätzen große Vorteile, da es nicht auf Trainingsdaten angewiesen ist. Zudem können Ursachen für einen hohen Leistungsbedarf abgeschätzt werden, weil Einzelanteile aufgeschlüsselt werden. Die im Vorhaben entwickelten Methoden stellen für die maritime Branche eine Basis für die Vorhersage und die Ermittlung der möglichen Ursachen für einen erhöhten Leistungsbedarf dar. Damit ist es in Zukunft möglich, effizienter und genauer Betriebsprofile abzuleiten und Änderungen im Betrieb des Schiffes vorzuschlagen.

### **Danksagungen**

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

## Referenzen

Araujo e Silva, R., 2023. pgmodeler - PostgreSQL Database Modeler. Brasilien: s.n.

Blendermann, W., 1993. Schiffsform und Windlast – Korrelations- und Regressionsanalyse von Windkanalmessungen am Modell, Hamburg: Technische Universität Hamburg-Harburg.

Huang, L., Pena, B., Liu, Y. & Anderlini, E., 2022. Machine learning in sustainable ship design and operation: A review. *Ocean Engineering*, 15 Dezember, Band 266, p. 112907.

International Organization for Standardization, 2016. ISO 19030-1:2016 - Ships and marine technology — Measurement of changes in hull and propeller performance. s.l.:ISO.

ITTC, 2017. Recommended Procedures and Guidelines. s.l.:s.n.

ITTC, 2021. Recommended Procedures and Guidelines - Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trials, s.l.: Specialist Committee on Ships in Operation at Sea of the 29th ITTC.

Jabary, W., Sprenger, F., Liu, C., Kleinsorge, L., Baumfalk, H., Kaster, M., Mewes, S., Neugebauer, J., el Moctar, O., 2023. Development of Machine Learning Approaches to Enhance Ship Operational Performance Evaluation Based on an Integrated Data Model. *Proceedings of the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference*, 19 Juni, pp. ISOPE-I-23-532.

Jabary, W., Sprenger, F., Jiang, C., Kleinsorge, L., Baumfalk, H., Mewes, S., Neugebauer, J., el Moctar, O., 2022. Development of a Unified Data Model to Improve Ship Operational Performance Analyses. *Proceedings of the 21st Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, 21-23 Juni, pp. 153-168.

Lang, X., Wu, D. & Mao, W., 2022. Comparison of supervised machine learning methods to predict ship propulsion power at sea. *Ocean Engineering*, 1 Februar, Band 245, p. 110387.

Liu, C., Musharraf, M., Li, F. & Kujala, P., 2022. A data mining method for automatic identification and analysis of icebreaker assistance operation in ice-covered waters. *Ocean Engineering*, 15 Dezember, Band 266, p. 112914.

Liu, S. & Papanikolaou, A., 2020. Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula. *Ocean Engineering*, 15 June, p. 107357.

Lodder, P., 2014. To Impute or not Impute, That's the Question. In: G. J. Mellenbergh & H. J. Ader, Hrsg. *Advising on research methods: Selected topics 2013*. s.l.:Johannes van Kessel Publishing.

Lyons, R., 2013. Distance covariance in metric spaces. *The Annals of Probability*, 41(5), p. 3284–3305.

Patey, M., 2019. Performance Monitoring Information Feedback to Design. Proceedings of 4th Hull Performance & Insight Conference, 6.-8. Mai, pp. 31-37.

Raaijmakers, Q. A. W., 1999. Effectiveness of Different Missing Data Treatments in Surveys with Likert-Type Data: Introducing the Relative Mean Substitution Approach. Educational and Psychological Measurement, Band 59, pp. 725-748.

Raven, H., 2016. A new correction procedure for shallow-water effects in ship speed trials. 13th International Symposium on Practical Design of Ships (PRADS).

Raven, H., 2019. Shallow -water effects in ship model testing and at full scale. Ocean Engineering, Band 189, p. 106343.

Sedgwick, P., 2012. Pearson's correlation coefficient. BMJ.

Wang, J. et al., 2021. Validation study on a new semi-empirical method for the prediction of added resistance in waves of arbitrary heading in analyzing ship speed trial results. Ocean Engineering, 15 November, Band 240, p. 109959.

Zar, J. H., 2005. Spearman Rank Correlation. In: P. Armitage & T. Colton, Hrsg. Encyclopedia of Biostatistics. s.l.: John Wiley & Sons, Ltd.

Zhang, M. et al., 2021. A Big Data Analytics Method for the Evaluation of Ship - Ship Collision Risk reflecting Hydrometeorological Conditions. Reliability Engineering & System Safety, Band 213, p. 107674.



# GreenLight

## Biobasierte Faserverbundwerkstoffe für strukturellen Leichtbau in Schiffen

### Autorenliste

Gideon Abels

Lea Pursche

Markus Wirtz

Katharina Koschek

Fraunhofer IFAM

Fraunhofer IFAM

MEYER Werft GmbH & Co. KG

Fraunhofer IFAM

---

### 1. Motivation

Die Seeschifffahrt ist elementar für den Welthandel sowie den Personentransport. Etwa 90 % des globalen Gütertransports erfolgt über den Seeweg. Schiffe sind damit eine Stellschraube für die Steigerung einer nachhaltigeren Ökonomie. Der Schiffsverkehr ist bereits heute für 2,6 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, mit einer prognostizierten steigenden Tendenz. Erste politische Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Schiffbau traten 2024 mit der Aufnahme des europäischen Seeverkehrs in den Europäischen Emissionshandel in Kraft. [1]

Emissionsreduktionen können klassischerweise über den Leichtbau erzielt werden. Bei Fracht- oder Passagierschiffen liegt der Effekt von leichteren Strukturen, im Unterschied zur Luftfahrt- oder Automobilbranche, im mehrstelligen Tonnenbereich.[2] Besonders herausfordernd ist die Substitution lasttragender Bauteile, die typischerweise aus Stahl gefertigt werden und alle Sicherheitsbestimmungen und Richtlinien erfüllen. Der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe (FVK) in anderen Branchen wie in der Luftfahrt, im Schienenfahrzeug- und Bootsbaubereich hat gezeigt, dass diese Materialklasse lasttragende Strukturen abbilden kann. Allerdings sind im Schiffbau die Brandschutzanforderungen besonders hoch. Die Richtlinie »Interim Guidelines for use of fibre reinforced plastic (FRP) elements within ship structures: fire safety issues« ist die Grundvoraussetzung für den Einsatz von FVK in SOLAS (International Convention for the Safety of Life on Sea) -Schiffen und aktuell auf nicht lasttragende Bauteile und Strukturen beschränkt, wie beispielsweise Verkleidungselemente. Das Konsortium bestehend aus Fraunhofer IFAM, MEYER WERFT GmbH sowie INVENT GmbH hat sich mit dem Verbundprojekt „GreenLight – Brandsichere und biobasierte Faserverbundwerkstoffe für den strukturellen Leichtbau in Schiffen“

dieser Herausforderung gestellt [3]. Ziel des Forschungsprojektes »GreenLight« war die Entwicklung biobasierter Faserverbundwerkstoffe mit intrinsischer Brand-sicherheit zum Einsatz als tragende Struktur inklusive Fertigungs- und Recycling-konzept. Begleitet wurde das Vorhaben von vier assoziierten Partnern mit ihrer Erfahrung zu Materialien und Halbzeugen sowie deren Nachhaltigkeit, Zulassung und Betriebssicherheit. Aufgrund der Langlebigkeit der Materialien wurden weitere Aspekte wie die Demontage, Bauteil- und Werkstoffkreisläufe bereits in der Kon-struktions- und Werkstoffentwicklungsphase berücksichtigt. Zur Demonstration der neuen Materialien wurden Treppenstufen und Treppenpodeste eines Treppen-hauses als Anwendungsfall definiert und umgesetzt.

### **Der Werkstoff: Leicht, biobasiert & brandgeschützt**

Der Leichtbau im Schiffbau erfordert FVKs, die die strengen Richtlinien der SOLAS Konvention und der Interim Guidelines erfüllen. Im Unterschied zu kon-ventionellen vernetzten Polymeren wie Epoxiden verfügen Polybenzoxazine über intrinsisch flammhemmende Eigenschaften. Aufgrund ihres flexiblen molekularen Designs steht ein breites Spektrum erneuerbarer Rohstoffe für die Herstellung der Benzoxazinmonomere zur Verfügung und die finalen Materialeigenschaften können zielgerichtet an die Anforderungen angepasst werden. Polybenzoxazinbasierte Leichtbaumaterialien bieten somit großes Potenzial für nachhaltigen Leichtbau in der Schifffahrt.

Als Matrix in FVK eingesetzt, entstehen Werkstoffe, die mit Stahl vergleichbare mechanische Eigenschaften, bezogen auf die im Schiff auftretenden Lastfälle, bei gleichzeitig signifikant geringerem Gewicht erzielen. Im Projekt wurde neben monolithischen FVKs auch die Sandwichbauweise verfolgt. Hierbei wird der Werk-stoff aus einem Kernmaterial und zwei außenliegenden FVK-Decklagen gefertigt. Ein nachhaltiges und preisgünstiges Kernmaterial ist Balsaholz (*Ochroma pyrami-dale*), das bereits als Konstruktionsmaterial für Rotorblätter von Windkraftanlagen und im Bootsbau etabliert ist.[4]

Aufgrund der potenziellen Gewichtsreduzierung und des inhärent guten Brand-verhaltens sind benzoxazinbasierte monolithische FVK und Sandwich-Werkstoffe mit Balsaholzkernen besonders interessant für den Schiffbau. Dabei wurde bei der Materialentwicklung der Nachhaltigkeitsaspekt nicht nur bezogen auf die Auswirkungen des Leichtbaus im Allgemeinen, sondern auch auf die Auswahl der Rohstoffe und Fertigungsprozesse betrachtet. Der Fokus auf nachwachsende Rohstoffe bedarf sowohl rohstoff- und energieeffiziente Synthesekonzepte für die Herstellung biobasierter Benzoxazinmonomere und -polymere mit für den Schiffbau passenden Eigenschaftsprofilen, als auch die Entwicklung optimierter FVK-Fertigungsprozesse.

## Biobasierte Polybenzoxazine für eine nachhaltige Zukunft

Benzoxazinmonomere entstehen in einer Kondensationsreaktion von Phenolen, Aminen und Aldehyden bei Temperaturen zwischen 70 °C und 120 °C. Für die biobasierte Alternative sind nachwachsende Rohstoffe in der Literatur zahlreich beschrieben, u.a. Zimt, Sesam und Vanillin. Im Projekt wurden biobasierte Benzoxazinmonomere beispielsweise aus Sesamol und aliphatischen Diaminen synthetisiert (Abb. 1). Dabei wurden biobasierte Anteile in den resultierenden Polybenzoxazinen zwischen 76 % und 97 % erreicht. Die Synthesen wurden entsprechend der Prinzipien der „Grünen Chemie“ energie- und ressourceneffizient entweder als Feststoffreaktion ohne Lösungsmittel oder unter Verwendung nachhaltiger Lösungsmittel wie Ethanol durchgeführt.

Die Kombinationsmöglichkeiten der unterschiedlichen nachwachsenden Rohstoffe resultieren in Polybenzoxazinen mit variablen Eigenschaften, die spezifische Vorteile für die Fertigung oder die Endanwendung mit sich bringen. Als besonders vorteilhaft erwiesen sich Copolymere aus zwei verschiedenen biobasierten Benzoxazinmonomeren. Diese zeigten bessere Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen, fossilbasierten Polybenzoxazin (Araldite MT35700 von Huntsman), welches auf Anilin und Bisphenol-F basiert. Beispielsweise liegt die Glasübergangstemperatur der biobasierten Copolymere mit >200 °C um mehr als 40 °C höher. Dies bestätigt das enorme Potenzial biobasierter Benzoxazine für Anwendungen mit hohen thermischen Anforderungen.

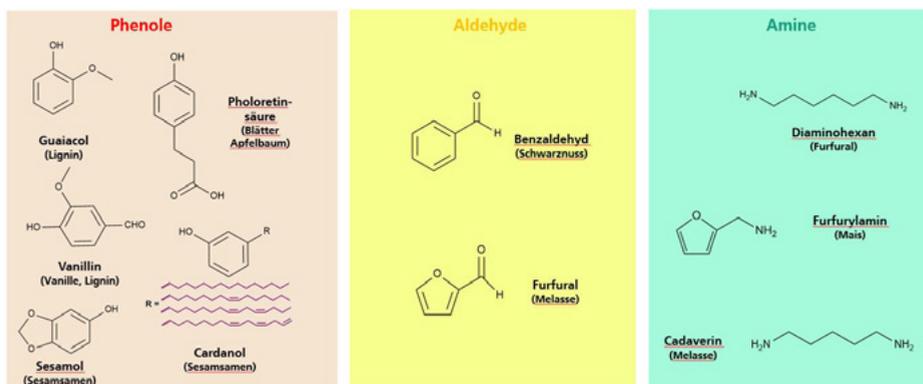


Abb. 1: Biobasierte Phenole, Aldehyde und Amine als Komponenten für die Herstellung von Benzoxazinmonomeren; Rohstoffquelle in Klammern.

## Benzoxazinbasierte Leichtbauwerkstoffe

Neben der Einstellung der Werkstoffeigenschaften stellt auch die Beschaffenheit der Rohstoffe und Halbzeuge für den Fertigungsprozess von FVK- und Sandwichbauteilen eine Herausforderung dar. Daher wurden im Projekt Fertigungsverfahren für ein fossil- und ein biobasiertes Polybenzoxazin entwickelt. Als fossilbasiertes

Benzoxazinharz wurde Araldite MT35700 dem kommerziell verfügbaren bio-basierten Polybenzoxazin FUROX FB 602 von Bitrez Ltd. mit einem biobasierten Anteil von 45 % gegenübergestellt [5].

Monolithische FVK-Platten und zur Versteifung vorgesehene FVK-Omegaprofile (Abb. 2) konnten durch eine Vakuuminfusion gefertigt werden. Die Infusion erfolgte bei 100 °C bis 140 °C, um eine für den Prozess hinreichend niedrige Viskosität zu erreichen. Als warmaushärtende Systeme benötigten die Benzoxazine bis zu 6 h bei 180 °C für eine vollständige Polymerisation. Das biobasierte Monomer muss zusätzlich im Autoklaven mit 15 bar Druck beaufschlagt werden, um Werkstoffe mit einer möglichst geringen Porosität zu erhalten. Die Porenbildung biobasierter Benzoxazine ist in der Literatur beschrieben und wird auf eine gewisse Zersetzung bzw. Verdampfung der Monomere im Bereich der Aushärtungstemperaturen zurückgeführt [6].

Die Fertigung von Sandwich-Werkstoffen auf Basis der konventionellen Benzoxazin-FVK-Decklagen und Balsaholzkern im Vakuuminfusionsverfahren erzielte vollständig imprägnierten Komponenten. Für eine hohe Reproduzierbarkeit und eine optimale Anbindung von Decklage und Holzkern war eine Beschichtung des Balsaholzes notwendig. Mit dem biobasierten Benzoxazinmonomer konnten keine Sandwich-Werkstoffe mittels Vakuuminfusion hergestellt werden, da das Balsaholz bei einem Druck von 15 bar nicht dimensionsstabil ist. Für dieses Benzoxazin wurden die FVK-Decklagen daher separat gefertigt, nach der Aushärtung mit einem benzoxazinbasierten Klebstoff beschichtet und bei 150 °C im Vakuumsack mit dem Balsaholzkern klebtechnisch gefügt. Diese Vorgehensweise bedeutet einen zusätzlichen Fertigungsschritt, resultiert aber in einer hohen Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Werkstoffqualität. Ein Vergleich der Anbindungsfestigkeiten der Decklagen an den Balsaholzkern zeigte kaum einen Unterschied in der Haftung der Decklagen zwischen einer infundierten zu einer geklebten Sandwichplatte.

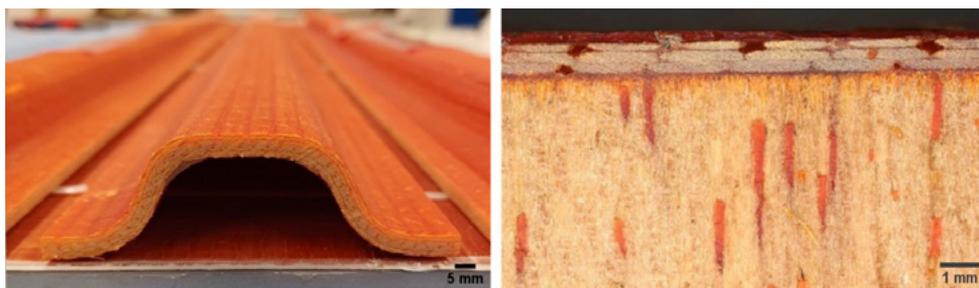


Abb. 2: Beispiele der hergestellten benzoxazinbasierten Leichtbaustrukturen im Querschnitt.

Links: von INVENT GmbH gefertigtes, monolithisches FVK-Omegaprofil,

rechts: Sandwichplatte bestehend aus FVK-Decklage und Balsaholzkern.

## Integration von polymeren Werkstoffen in Stahlstrukturen

Zu einem ganzheitlichen Konzept bei der Substitution einzelner stahlbasierter Schiffskomponenten durch Leichtbauwerkstoffe ist es zwingend erforderlich passende Fügekonzepte und Bauweisen der resultierenden Multimaterialkomponenten zu entwickeln. Für die Integration der FVK- und Sandwichplatten als Treppenstufe und -podest wurden unterschiedliche mechanische, klebtechnische und thermische Verbindungstechnologien betrachtet, um die Leichtbaukomponenten mit dem Stahlrahmen zu einem Treppenstufendemonstrator zu fügen. Es wurden zwei finale Fügekonzepte näher untersucht. Für den klebtechnischen Ansatz wurde ein für den Einsatz im Schiffbau zertifizierter, struktureller Klebstoff (Sikaflex® 268 PowerCure) und für das thermische Fügen der sogenannte FAUSST-Verbinder der Firma Hyconnect verwendet, ein stahlbasierter Hybridwerkstoff. Bei dem FAUSST-Verbinder handelt es sich um ein Verbindungselement, das aus einem monolithischen Stahlblech in ein hybrides Stahl- und Glasfasertextil übergeht [7]. Die Textilseite wird in den Lagenaufbau der FVKs integriert, wodurch das FVK nach der Aushärtung über einen Stahlrand verfügt, der mit dem Treppengerüst in einem stoffschlüssigen Fügeprozess verschweißt werden kann. (vergl. Abb. 3).

Mit dem Sikaflex® 268 PowerCure gefertigten Proben wurden verschiedensten Auslagerungsbedingungen unterworfen, z.B. Lagerung bei hohen und tiefen Temperaturen und unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten. Anschließende Raupenschälversuche ergaben eine gute Haftung unabhängig von den Auslagerungsbedingungen. FVK-Proben mit integriertem FAUSST-Verbinder zeigten in Zug- und Dauerschwingversuchen, dass die Verbindungen hohe Festigkeiten aufwiesen, 300.000 Belastungszyklen standhielten und die Schweißnaht zwischen Stahlblech und Stahldrähten die lasttragende Komponente darstellt. Die ersten Experimente zeigten, dass der FAUSST-Verbinder hinsichtlich der Verarbeitung, des Fügeprozesses und der Dauerbeständigkeit einen interessanten Werkstoff im Bereich hybrider Werkstoffverbindungen für die Schifffahrt darstellt.



Abb. 3 Querschnitt eines monolithischen FVKs mit integriertem FAUSST-Verbinder.

Darüber hinaus wurde das klebtechnische Fügen von Omegaprofilen zur Versteifung der monolithischen FVK-Platten untersucht. Quasi-statische Zugscherversuche ergaben, dass für diesen Anwendungsfall der Scotch Weld 7240 B/A FR am besten geeignet ist, da die Klebung flexibel ist bzw. größere Dehnungen toleriert und somit Spannungsspitzen beim Belasten der Treppenstufe reduzieren kann.

## **Brandverhalten**

Die Brandbeständigkeit ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Prüfung der Eignung alternativer Materialien für den Einsatz im Schiffbau. Daher wurden sowohl monolithische FVKs als auch die Leichtbaumaterialien in der Sandwichbauweise mit Balsaholzkern gemäß des FTP-Codes 2010 in einer zertifizierten Prüfanstalt auf ihr Brandverhalten hin geprüft. Sowohl die Brandschutzprüfungen als auch die Prüfkörperbeschaffenheit sollten möglichst anwendungsspezifisch und realitätsnah ausgelegt werden. Daher wurden die Sandwiche und FVKs mit dem Dichtmittel SikaFiresil mit einem Stahlrahmen eingefasst, um insbesondere den Balsaholzkern profillseitig zu schützen. Neben einzelnen Substanzproben wurde darüber hinaus ein Demonstrator mit unterschiedlich ausgelegten FVK-Stufen und -Podest in einem Großbrandversuch betrachtet.

In den FTP Code Prüfungen zeigten die polybenzoxazinbasierten FVKs und Sandwiche insbesondere im Nichtbrennbarkeitstest (Part 1) ein unzureichendes Brandverhalten, wobei Proben auf Basis des biobasierten Polybenzoxazin im Vergleich zu dem fossilen Analogon im Allgemeinen schlechter abschnitten. Im FTP Code Part 5-Test fielen die Materialien nur sehr knapp durch. In Anbetracht dessen, dass den Werkstoffen keinerlei Brandschutzadditive zugesetzt wurden, zeigen die Ergebnisse das grundsätzliche Potenzial der Werkstoffe auf. Harzformulierungen mit geringen Mengen an Brandschutzadditiv sollten das Brandverhalten der Komponenten verbessern und die thermische Beständigkeit der Bauteile positiv beeinflussen. Im Großbrandversuch wurde der Treppenaufbau mit Stufen und Podest offenem Feuer ausgesetzt und die Stufen vor und nach der Beflammung mit Gewichten belastet. Der Test ergab, dass die mit Omegaprofilen verstärkte Treppenstufe nach der Beflammung immer noch mehr als 100 kg Gewicht tragen konnte. Im Fall eines Brandes wären entsprechende Treppen damit grundsätzlich noch begehbar.

Das Bestehen der Nichtbrennbarkeits-Prüfung gemäß FTP Code Part 1 ist eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz von Materialien im Schiffbau. Die Prüfungen haben gezeigt, dass die hohen Prüftemperaturen von 900 °C Materialien und vor allem Klebstoffe aus anorganischen Polymermatrices erfordern. Die polybenzoxazinbasierten Komponenten konnten aufgrund ihrer organischen Struktur den hohen Temperaturen nicht standhalten. Der eingesetzte Klebstoff hat maßgeblich zur Brennbarkeit der Substanzproben beigetragen. Alternative Fügeverfahren wie der FAUSST-Verbinder und der Einsatz anorganischer Polymere und Kernmaterialien könnten das bereits im Projekt aufgezeigte Leichtbaupotenzial mit der notwendigen thermischen Beständigkeit ergänzen.

## **Neue Möglichkeiten der Strukturüberwachung durch Sensorintegration**

Die FVK-Bauweise bietet die Möglichkeit der Integration von Sensoren in die Struktur und damit die Möglichkeit der in-situ Überwachung im Sinne des Structural Health Monitorings. Besonders relevant ist eine Strukturüberwachung bei dauerbelasteten Bauteilen. Dies trifft auf den betrachteten Anwendungsfall eines Treppenhauses in Schiffen zu, da die Stufen und Podeste über mehrere Jahre mit variierender Frequenz be- und entlastet werden. Aufgrund der erwarteten Lastfälle wurde im Projekt die Detektion der Verformung durch statische Lasten fokussiert.

Strukturelle Zustandsüberwachung erfordern i) die Integration von Sensoreinheiten in die Faserverbunde, ii) die Gewährleistung mechanischer Integrität der mit den Sensoren versehenen Bauteile und iii) die Zuverlässigkeit sowie Reproduzierbarkeit von Messungen. Typischerweise zur Deformationsmessung eingesetzte Dehnungsmessstreifen bestehen aus einer Messgitterfolie aus Widerstandsdraht, der auf einen dünnen Kunststoffträger appliziert und beidseitig von einer Folie geschützt wird. Beim Einsatz in FVK birgt die Folie jedoch ein hohes Risiko an Delamination, daher wurde ein alternativer und innovativer Ansatz mittels 3D-Druckverfahren verfolgt. Dazu wurde ein Zuleitungs- und ein Messmaterial in definierter Geometrie auf Glasfasertextilien gedruckt (vergl. Abb. 4). Das silberbasierte Zuleitungsmaterial ist niederohmig und dient allein der Kontaktierung. Das Messmaterial hingegen ist eine poröse, hochohmige Kohlenstoffmatrix, deren Widerstand sich abhängig von der Deformation ändert, vergleichbar mit den konventionellen Dehnungsmessstreifen. Die gedruckten Sensoren sind kompatibel mit kommerzieller Messelektronik und werden in den Lagenaufbau der FVKs integriert. Mithilfe der Sensoren sollen Materialdefekte während der Nutzungsphase anhand der Änderung des elektrischen Widerstands der Sensoren detektiert werden. Bei einer Dehnung des Werkstoffs steigt der Widerstand, bei einer Stauchung sinkt er. Änderungen über die Zeit der Belastung sowie ein Ausfall des Signals können Hinweise auf Schädigungen wie Mikrorisse und Delaminationen sein. Die Sensorintegration eröffnet damit eine Präventionsmethode, die das Totalversagen der Struktur verhindern kann. Das Druckverfahren für Sensoren ermöglicht neben der Vermeidung von Kunststofffolien vor allem die Variabilität der Auslegung an Geometrie, Größe und Anforderungen. Außerdem sind die Sensoren bis zu 200 °C beständig und daher auch mit den hohen Aushärtungstemperaturen der Polybenzoxazine von bis zu 180 °C thermisch kompatibel. Untersuchungen mit Epoxid- und Benzoxazinharzen bei verschiedenen Temperaturen haben jedoch gezeigt, dass die thermische Ausdehnung der Harze in der porösen Kohlenstoffstruktur des Sensors eine strukturelle Schädigung während der Aushärtung verursacht. Daher sind zusätzliche Modifikationen notwendig, um das Potenzial der gedruckten Sensoren voll ausnutzen zu können.

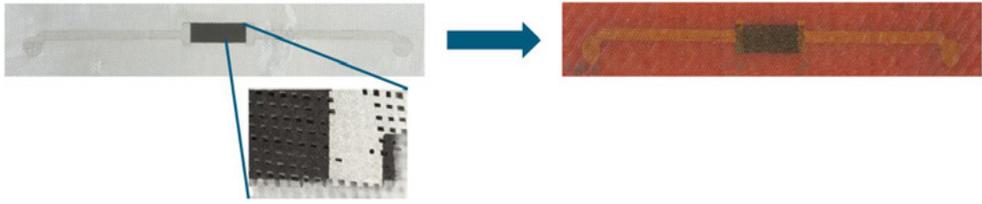


Abb. 4: Ein auf Glasfasern 3D-gedruckter Sensor, der über die Vakuuminfusion in das FVK integriert wird.

### Ökologische Betrachtung

Die Nachhaltigkeitsbetrachtung des Vorhabens erfolgte in zwei Stufen: i) die Ökobilanzierung (LCA, engl: life cycle assessment) der Werkstoffe für die Herstellung und ii) die Betrachtung der absoluten Gewichtseinsparung und damit der potenziellen Emissionsreduzierung während der Nutzungsphase. Im ersten Ansatz wurde der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Treppenstufenmaterialien berechnet. Dieser umfasst alle Einflussfaktoren von der Wahl der Rohstoffe über die Fertigungsverfahren bis hin zur fertigen Treppenstufe. Die Synthesen der am Fraunhofer IFAM entwickelten biobasierten sowie des kommerziellen fossilen Benzoxazins wurden für die Ökobilanzierung auf eine theoretische industrielle Herstellungsmenge von 500 L skaliert, mit einer für industrielle Produktionen typischen Lösungsmittel-recyclingrate von 90 %. Die Referenzeinheit waren Stahlstufen.

Die Ergebnisse der Modellierungen zeigen, dass die Benzoxazinstufen mit 60,8 kg CO<sub>2</sub> für das neu entwickelte, biobasierte Copolymer sowie 66 kg CO<sub>2</sub> für das fossile Harzsystem einen dreimal höheren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck besitzen als die Stahlstufen mit 23 kg CO<sub>2</sub>. Eine Hotspot-Analyse ergab, dass ein wesentlicher Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei den Leichtbaustufen aus dem hohen Energiebedarf der Monomersynthese und der biobasierten Rohstoffe resultieren. Die Rohstoffherstellung für neuartige und biobasierte Kunststoffe ist aufwändiger und industriell noch nicht so hochgradig optimiert wie für seit Jahrzehnten etablierte Stoffe. Zudem sind die für die LCA benötigten Daten oft nicht hinreichend in Datenbanken vorhanden, weshalb auch in den hier durchgeführten Modellierungen mehrere Datensätze angenähert werden mussten [8]. Die ermittelten CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke der Treppenstufenmaterialien sind daher grundsätzlich fehlerbehaftet und als Tendenz zu interpretieren.

Höhere Emissionen bei der Herstellung von Leichtbaumaterialien im Vergleich zu konventionellen Metallbauteilen sind ein typisches Phänomen, dem üblicherweise deutliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch Gewichtseinsparungen in der Nutzungsphase gegenüberstehen. Bei der Substitution von Stahlstufen und -podesten eines Treppenhauses führt der Einsatz monolithisch-verstärkter FVK-Stufen zu einer Gewichtsreduktion von bis zu 47 % und mit FVK-Balsaholz-Sandwiches zu einer Gewichtseinsparung von bis zu 75 %. Beim Podest kann das Gewicht um bis zu

48 % bzw. bis zu 80 % reduziert werden (Abb. 5, Abb. 6). Bezogen auf alle Treppen eines Kreuzfahrtschiffes der Meyer Werft ergaben sich daraus absolute Gesamtgewichtseinsparung von maximal 25,5 t und 41,4 t. In der Schifffahrt bedarf es Gewichtsreduktionen von mehreren hundert Tonnen, um den Treibstoffverbrauch zu beeinflussen. Die Treppenhäuser sind nur ein Beispiel für die Nutzung nachhaltiger Leichtbaustrukturen aus FVK. Weitere potenziell substituierbare Strukturen sind Trennwände, Zwischendecken oder Verkleidungselemente. Insgesamt zeigen die Ergebnisse das große Potenzial von Leichtbaustrategien zur Reduktion von Treibstoffverbrauch und Emissionen im Schiffbau.

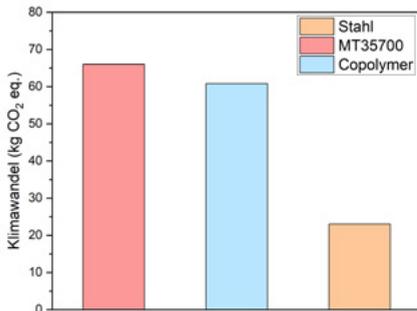


Abb. 5: CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke zweier Benzoxazin-FVK Treppenstufen im Vergleich zu einer Stahlstufe.

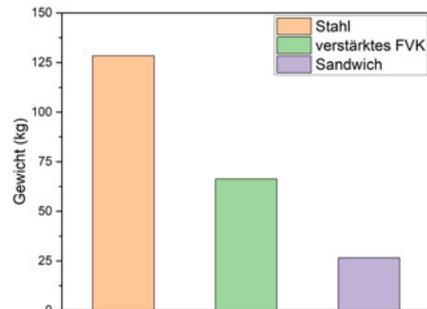
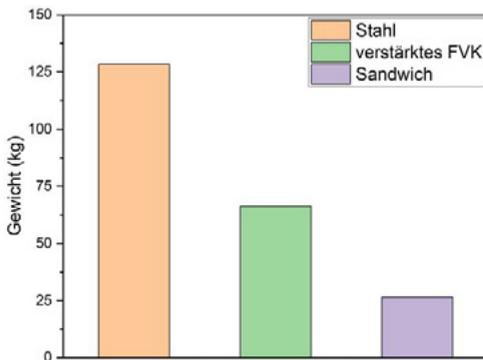


Abb. 6: Potenzielle Gewichtseinsparung der Leichtbaustufen (links) und des Podests (rechts) gegenüber der Stahlvariante.

## Recyclingkonzept

Parallel zur Treppenfertigung wurden auch Recyclingkonzepte für monolithische FVKs und Sandwich-Werkstoffe entworfen.

Unabhängig vom Leichtbaumaterial muss im ersten Schritt die strukturelle Klebverbindung zwischen Treppenstufe und Stahlgestell getrennt werden, beispielsweise mittels Schneidedraht oder mittels speziellen Debonding-on-Demand Primern. Auf diese Weise können beschädigte Stufen leicht ausgetauscht werden. Bei den monolithisch-verstärkten Treppenstufen kann die Klebverbindung

zwischen Omegaprofil und FVK-Platte beispielsweise durch Keilverfahren, thermisch oder chemisch durch Aufquellen mittels Lösungsmitteln getrennt werden, um intakte Omega-Stringer von beschädigten Treppenstufen zu lösen und wiederzuverwenden. Bei Sandwichen können die Decklagen durch thermische oder chemische Stimuli beim Einsatz debondingfähiger Matrix- und Klebstoffsysteme vom Holz gelöst bzw. ausgetauscht werden.

Nicht reparierbare FVK-Komponenten können im letzten Schritt in solvolytischen Recyclingverfahren verwertet werden. Dabei wird die Benzoxazinmatrix chemisch aufgelöst und die Fasern abgetrennt. Die Fasern werden gewaschen und für die FVK-Fertigung wiederverwendet, die aufgelösten Bestandteile der Benzoxazinmatrix isoliert und zur Synthese neuer Monomere verwendet.

### **Fazit & Perspektiven**

Im Rahmen des „GreenLight“-Projekts wurden nachhaltige Leichtbaustrukturen gefertigt, die für den Anwendungsfall als Treppenstufen und -podest den mechanischen Belastungen gerecht werden und zu signifikanten Gewichtseinsparungen führen. Die Einzelstufen des funktionsfähigen Demonstrators (vergl. Abb.: 7) konnten nach einem realitätsorientierten Großbrandversuch mit mehr als 100 kg belastet werden. Neben den Werkstoffen selbst hatte der verwendete Klebstoff einen negativen Einfluss auf das Brandverhalten. Die in GreenLight erarbeiteten klebtechnischen und thermischen Fügekonzepte zeigen alternative Fugeszenarien auf. Die aktuelle Formulierung und Bauweise der Leichtbaustrukturen erfüllen jedoch nicht die Brandschutzanforderungen gemäß den IMO-Richtlinien im Schiffbau.

Die Materialentwicklungsaktivitäten haben neue biobasierte und nachhaltigere Polybenzoxazine und die dafür passende ressourcen- und energieeffiziente Fertigungstechnologien hervorgebracht, die das Potenzial biobasierter Verbundwerkstoffe für den strukturellen Leichtbau aufzeigen.

Für die Strukturüberwachung im Betrieb bieten FVK-Bauteile neue Möglichkeiten. Die Integration 3D-gedruckter Sensoren ermöglicht eine maximale Flexibilität in der Auslegung und Bauteilgeometrie. Die thermische Ausdehnung bei der Aushärtung infundierter Sensoren scheint die poröse Schicht im Sensor jedoch zu schädigen. Zukünftig sollen diese entsprechend zuvor beschichtet werden, um die Funktionsfähigkeit über den Herstellungsprozess hinaus zu erhalten. Das Leichtbaupotenzial der im „GreenLight“-Projekt entwickelten Strukturen ist mit Gewichtseinsparungen von ca. 50 % mit monolithischen Strukturen und bis zu 75 % mit Sandwichbauteilen signifikant gegenüber Stahl. Weitere Anwendungsmöglichkeiten wie Tank-, Poolstrukturen, Verkleidungselemente, Zwischendecken und -wände oder Ein-

hausungen an Deck und von Schornsteinen können die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Schifffahrt weiter reduzieren.



Abb. 7: Demonstrator, mit verschiedenen Stufendesigns: ein Sandwich aus Balsaholz und biobasierten (oberste Stufe) und fossilbasierten Benzoxazin-FVK (zweite Stufe von unten) sowie eine verstärkte monolithische Stufe aus fossilbasierten Polybenzoxazin-FVK (dritte Stufe von unten). Die unterste Stufe ist die Referenz-Stahlstufe. Das Treppenpodest ist ebenfalls eine monolithisch-verstärkte fossile FVK-Platte.

## Literatur

[1] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/meere/nutzung-belastungen/schiff-fahrt#fakten-zur-seeschifffahrt-und-zu-ihren-auswirkungen-auf-die-umwelt>

(aufgerufen: 06.08.2024, 12:18 Uhr)

[2] C.A. Buchanan et al., Lightweighting shipping containers: Life cycle impacts on multimodal freight transportation, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, Vol. 62, 418-432,

[3] GreenLight gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, Förderkennzeichen: 03SX515E, Projektträger: Projektträger Jülich (PtJ)

[4] J. Galos et al., Review of balsa core sandwich composite structures, *Materials & Design*, 2022, 221, 11013.

[5] G. Abels et al., Introduction of the first commercial biobased benzoxazines for the manufacturing of fibre reinforced polymers, *RSC Sustainability*, 2024, DOI: 10.1039/d4su00192c.

[6] H. Ding et al., Recent Advances in Flame Retardant Bio-Based Benzoxazine Resins, *Journal of Renewable Material*, 2022, 10, 871.

[7] <https://hyconnect.de/wp-content/uploads/2023/09/FAUSST-Verbindungstechnologie.pdf>

(aufgerufen am 12.09.2024, 19:18 Uhr)

[8] A. Grabowski et al., Life cycle inventory data quality issues for bioplastics feedstocks, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20, 584-596.

# DeffProForm

## Design von effizienten Schiffspropellern mit unkonventioneller Formgebung

### Autorenliste

<b>Eckhard Praefke</b>	ISA Propulsion GmbH & Co.KG
<b>Adhil Asif</b>	MMG, Mecklenburger Metallguss GmbH
<b>Lutz Kleinsorge</b>	MMG, Mecklenburger Metallguss GmbH
<b>Claus Abt</b>	FSYS, Friendship Systems AG
<b>Thomas Lücke</b>	HSVA, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH
<b>Katrin Hellwig-Rieck</b>	SVA - Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH
<b>Ginevra Rubino</b>	TUHH - Technische Universität Hamburg, FDS - Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie
<b>Roland Gosda</b>	TUHH - Technische Universität Hamburg, FDS - Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie
<b>Moustafa Abdel-Maksoud</b>	TUHH - Technische Universität Hamburg, FDS - Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie
<b>Nils Damaschke</b>	URO, Universität Rostock, AE - Institut für Allgemeine Elektrotechnik

---

### 1. Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels hat die International Maritime Organisation (IMO) ein Maßnahmenpaket auf den Weg gebracht, um der Schifffahrt Ziele zur Reduktion des Schadstoffausstoßes durch die Verbrauchsminimierung fossiler Brennstoffe und zur Effizienzerhöhung zu setzen. Neben der Begrenzung des Schadstoffausstoßes sind in küstennahen und geschützten Zonen einiger Seegebiete Vorgaben zur Lärmemission zum Schutz der maritimen Umwelt zu erfüllen. Dementsprechend ist die Effizienzsteigerung von Schiffsantriebsanlagen bei gleichzeitiger Reduzierung der Schadstoff- und Geräuschemissionen ein wesentlicher Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten im maritimen Bereich.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „DeffProForm“ wurden die Erfahrungen von Propellerentwerfern, Propellerherstellern, Schiffbauversuchsanstalten und Universitäten beim Entwurf und der Analyse moderner Schiffspropulsionsorgane gebündelt, um Entwurfs- und Berechnungsstrategien für unkonventionelle Propellerformen zu entwickeln. Unkonventionelle Propellerformen bieten dem

Entwerfer zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten, um verbesserte hydrodynamische Kennwerte in Hinblick auf Wirkungsgrad und Lärmemission zu erreichen.

Essenziell für die Validierung der numerischen Verfahren ist der Vergleich mit Messdaten. Während für den Modellmaßstab eine Reihe von Strömungsmesstechniken existieren sind Strömungsmessungen an realen Großausführungen sehr herausfordernd. Messtechnische Motivation und Zielsetzung war somit die Weiterentwicklung von Strömungsmesstechniken für Großausführungen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist neben dem fachlichen Erkenntnisgewinn die Verbesserung der Werkzeuge, um Entwurf, Optimierung und Prognosegenauigkeit unkonventioneller Propeller zu gewährleisten. Innerhalb der entwickelten Entwurfs- und Simulationsumgebungen konnten mit systematischen Serienuntersuchungen Ersatzmodelle geschaffen und getestet werden, die den Wert von KI-Modellen im Propellerentwurf untermauern.

## 2. Konzeption

Im Rahmen des Vorhabens sind Entwurfsmethodiken auf der Basis von CAD und CFD-Verfahren für neuartige Geometrien entwickelt worden. Um die Hauptziele des Vorhabens quantifizieren zu können, wurden mit diesen Verfahren jeweils drei neuartige Propellergeometrien für zwei verschiedene Beispielschiffe erstellt, durch Modellversuche überprüft und mit konventionellen Propellern verglichen. Einschrauben-Containerschiff: HSVA Hamburg Container Ship (HCS), 8000 TEU Containerschiff der Post-Panmax Klasse, 325 m Länge, Geschwindigkeit 22 kn Zweischrauben-Megayacht (SVA): 60 m Länge, Geschwindigkeit 17 kn, mit Bugwulst, Skeg und einem Paar Stabilisierungsflossen

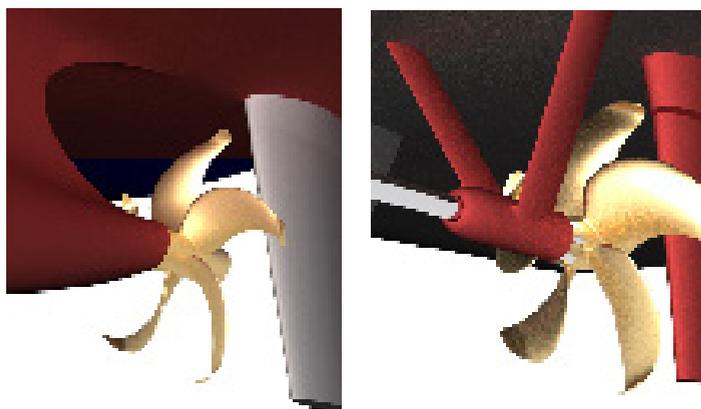


Abb. 1: Unkonventionelle Propellerentwürfe an den Beispielschiffen

### 3. Entwicklung

Das im Forschungsvorhaben HYKOPS entwickelte Framework zur Profilbasierten Erstellung von Propellergeometrien wurde in DEffProForm angepasst und weiterentwickelt. Im Konsortium wurden gemeinsam formgebende Geometrieparameter gewählt, die in Steuerungsskripten für einen automatisierten Entwurf umgesetzt wurden. Mit den Steuerungsskripten können sowohl neue Geometrien erstellt als auch existierende konventionelle zu unkonventionellen Tip-Rake-Geometrien modifiziert werden. Um die umständliche Anpassung der Neigung der Profile an den maßgeblichen unkonventionellen Parameter des Hangs vorzunehmen, wurde eine automatisierte Ausrichtung der Profile an der Skelettlinie der Propellerblätter eingeführt. Durch die Integration der Steuerungsskripte in CAESES kann der Einfluss der Parameter auf die Formgebung visualisiert werden. Weiter wurde eine Schnittstelle zwischen den von CAESES erstellten Rechengittern und panMARE entwickelt. Die Werkzeuge und Schnittstellen ermöglichen die Integration der Entwurfswerkzeuge in digitale, automatisierte Prozessketten. Innerhalb von CAESES ist eine automatisierte Überführung von konventionellen Propellerbeschreibungen in unkonventionelle Propeller implementiert worden, die eine unmittelbare Gegenüberstellung der jeweiligen Eigenschaften mit den angebundenen Simulationswerkzeugen ermöglichen.

Abb. 2 zeigt beispielhaft einen unkonventionellen Propeller mit lokalen kartesischen u-w-Koordinatensystemen, deren Orientierungswinkel  $\Phi_u$ ,  $\Phi_w$  die Verdrehung der Profildinaten um die jeweilige u- und w-Koordinate ermöglichen. Beide Parameter erlauben es, die Blattform entsprechend den hydrodynamischen Bedürfnissen bis zur Flügelspitze anzupassen.

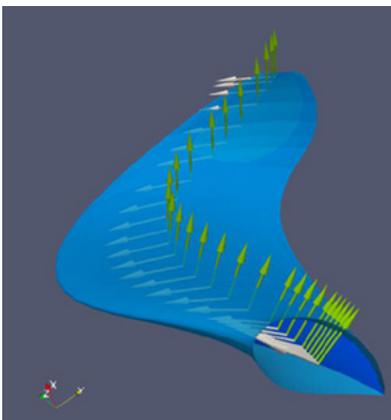


Abb. 2: Basisvektoren  $u$  (weiß) und  $w$  (grün) als Basis der zusätzlichen Orientierungswinkel  $\Phi_u$ ,  $\Phi_w$

Die Erstellung des Rechengitters in panMARE wurde erfolgreich an die unkonventionelle Formgebung der Propeller angepasst und in Freifahrt-, Propulsions- und Seegangssimulationen erprobt. Für die Sicherstellung der numerischen Qualität

der Simulationen wurden für Freifahrt und Propulsion geeignete Konvergenzkriterien entwickelt, die insbesondere in der Optimierung Berücksichtigung fanden. In zwei Optimierungen wurde das Potential der in DEffProForm entwickelten numerischen Modelle und Schnittstellen für Prozessketten gezeigt [5].

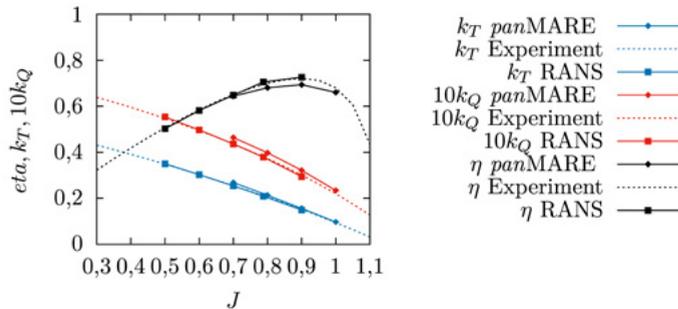


Abb. 3: Vergleich von Propellerfreifahrt- Charakteristika des unkonventionellen Propellers P3590 (panMARE, Experiment, RANS)

Zur Simulation der viskosen Umströmung unkonventioneller Propeller in RANS wurden die Erstellung des Rechengitters und die Methodik überarbeitet. Die Erweiterungen umfassten die Einbeziehung der Nabengeometrie und die Erstellung des Rechengitters für die Auflösung der Strömung im Transitionsbereich.

Die Kopplung des RANS-Verfahrens mit panMARE zeigt vielversprechende Ansätze für zukünftige Bewertungen der Propellerleistung im Seegang und ihrer Wechselwirkung mit dem Rumpf. Dieser Ansatz bietet reduzierte Berechnungskosten im Vergleich zu vollständig aufgelösten Simulationen, bei denen sowohl der Propeller als auch der Rumpf zusammen modelliert werden. Darüber hinaus bietet er eine höhere Genauigkeit im Vergleich zu virtuellen Aktuatorscheiben-Modellen, da das von panMARE für die tatsächliche Propellergeometrie berechnete Kraftfeld in eine Kraft- und Momentenquellenverteilung umgewandelt und im Rechengitter des RANS-Lösers genau abgebildet wird.

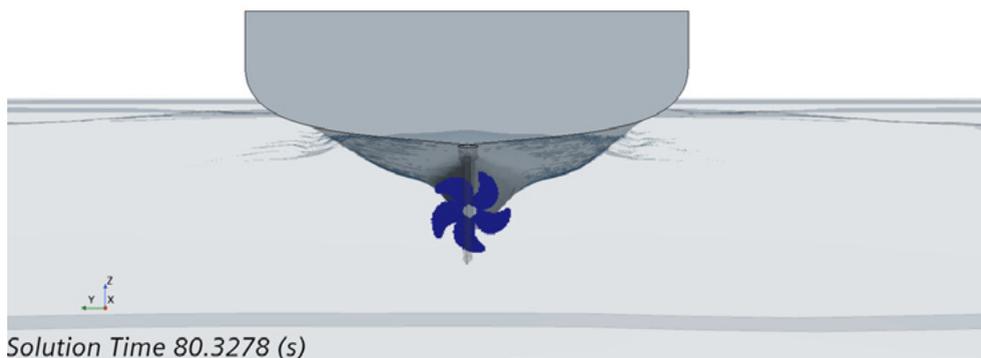
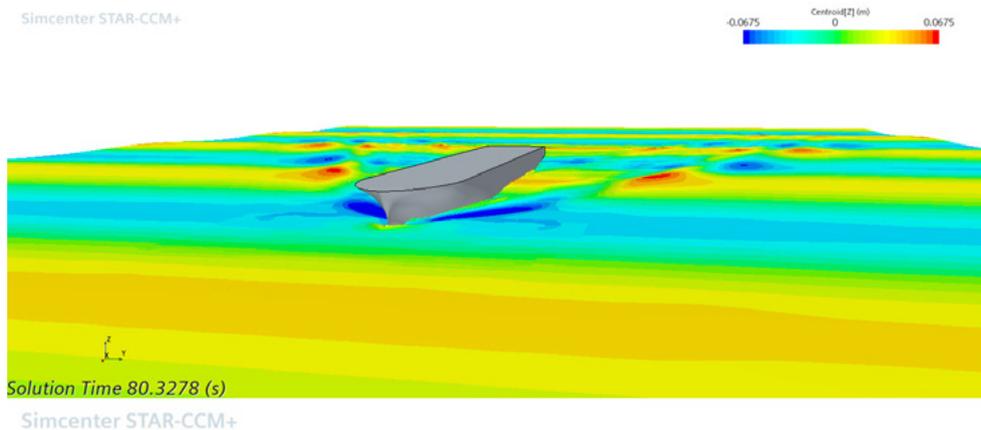


Abb. 4: Kopplung des RANS-Verfahrens mit panMARE am Beispiel des Schiffs im Seegang

#### 4. Versuche

Konventionelle Referenz-Propeller und unkonventionelle Alternativ-Entwürfe wurden bezüglich Propulsions- und Kavitationseigenschaften in den Schlepptanks und Kavitationstunneln der SVA und HSVA untersucht, um jeweils die Leistung-Drehzahl-Geschwindigkeits-Relationen zu bestimmen, möglicherweise unerwünschte Kavitationsphänomene zu erkennen und die Vibrationsanregung im Hinterschiff zu ermitteln.

In den folgenden Tabellen Tab. 1, 2 sind die Hauptparameter der untersuchten Propeller beider Beispielschiffe einander gegenübergestellt. Abb. 5 zeigt die 4 Modellpropeller zum HSVA Hamburg Container Ship (HCS) und gibt einen Eindruck der verwirklichten Tip-Rake Varianten.



Abb. 5: In der HSVA untersuchte Modellpropeller zum HSVA Hamburg Container Ship (HCS)

Tab. 1: Hauptparameter des Referenz- und der Entwurfspropeller zum HSVA Hamburg Container Ship (HCS)

Propeller	P3509	P3589	P3590	P8766
Typ	konventionell	Tip-Rake	Tip-Rake	Tip-Rake
D (m)	9.5	9.5	9.5	9.6
Ae/A0	0.665	0.726	0.603	0.453
Pm/D	1.044	1.131	1.082	1.063
Z	5	5	5	5

Tab. 2: Hauptparameter des Referenz- und der Entwurfspropeller zur SVA Megayacht

Propeller	P1941/1948	P1949	P1951	DPF v3-7-3 RH
Typ	konventionell	Tip-Rake	Tip-Rake	Tip-Rake
D (m)	2.25	2.25	2.25	2.25
Ae/A0	1.0249	1.0096	1.0249	0.9240
Pm/D	1.0249	1.0096	1.0249	0.9240
Z	5	5	5	5

Zur Verifizierung der prognostizierten Propellereigenschaften wurden die Freifahrts- und Propulsionsversuche auf dem Entwurfstiefgang durchgeführt. Der sich in der Entwurfsgeschwindigkeit ergebende Propulsionswirkungsgrad  $\eta_D$  der einzelnen Propeller wurde als Relation zum Referenzpropeller  $\eta_D/\eta_{D0}$  (Referenz) dargestellt. Bei der chronologisch zuerst untersuchten SVA Mega-

yacht wurde keine Wirkungsgraderhöhung erzielt. Beim Hamburg Container Ship fiel der Wirkungsgradgewinn der untersuchten Tip-Rake Propeller mit 0 % und 1.5 % zwar etwas geringer aus als im Entwurf prognostiziert, aber es zeigte sich anhand dieses Fortschritts, dass die Entwerfer in diesem Projekt bereits die ersten Erfahrungen gesammelt und umgesetzt hatten.

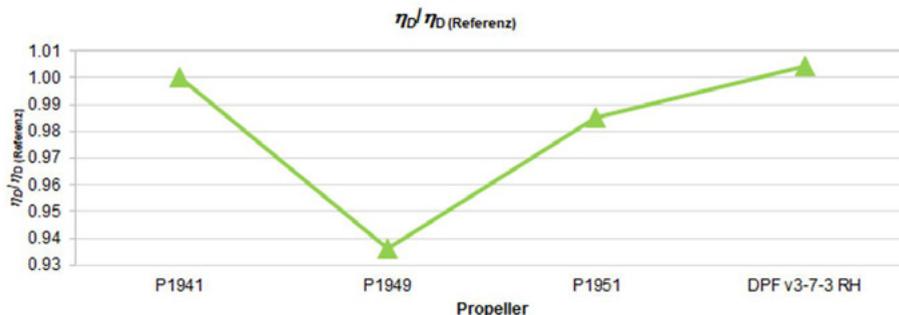


Abb. 6: Propulsionswirkungsgrade bezogen auf den Referenzpropeller zur SVA Megayacht

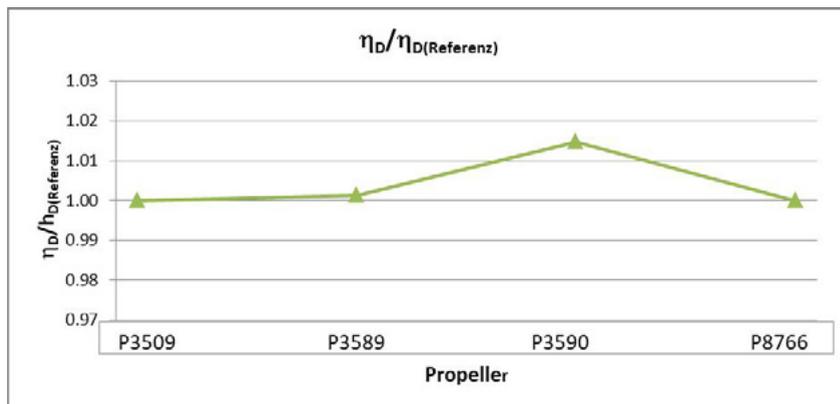


Abb. 7: Propulsionswirkungsgrade bezogen auf den Referenzpropeller zum HSVA Hamburg Container Ship (HCS)

Der Schubbelastungsgrad  $c_{th}$  von ca. 0.9 bis 1.1 kann dabei als herausfordernder Start für eine Tip-Rake-Propellerentwicklung angesehen werden, da die induzierten Verluste unter diesen Umständen relativ gering sind und der Vorteil eines Tip-Rake-Propellers eher bei höheren Belastungen liegt.

Im Kavitationstunnel der SVA wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

Der Vergleich der Kavitationseinsatzkurven der untersuchten Propeller am Dummymodell zeigt folgende Unterschiede:

- P1949 hat einen kleinen kavitationsfreien Bereich,
- P1941, P1951, DPV3-7-3 RH sind hinsichtlich der Saugseitenkavitation gefährdet,
- bei DPV3-7-3 RH setzt die Blasen kavitation deutlich früher ein als bei den Vergleichspropellern.

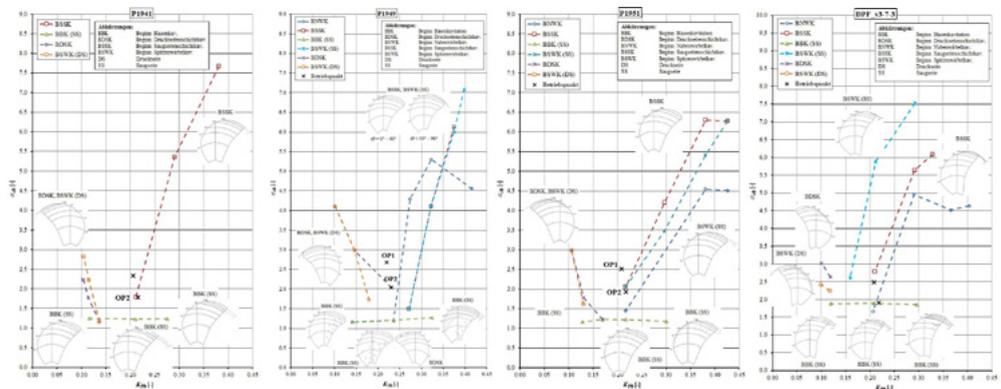


Abb. 8: Kavitationseinsatzdiagramme der Propeller für die SVA Megayacht

Bei den Druckschwankungsamplituden wurde festgestellt, dass P1949 mit stark ausgeprägtem Tip-Rake zur Saugseite die geringsten Druckschwankungen im Vergleich mit allen untersuchten Propellern auftreten und der Ort der maximal gemessenen Druckschwankung sich vor die Propellerebene verschiebt, während P1951 mit stark ausgeprägtem Tip-Rake zur Druckseite die höchsten Druckschwankungen hatte. – Die Druckschwankungsamplituden höherer Ordnung sind für alle untersuchten Propeller annähernd eine Größenordnung geringer und liegen unter 0.11 kPa.

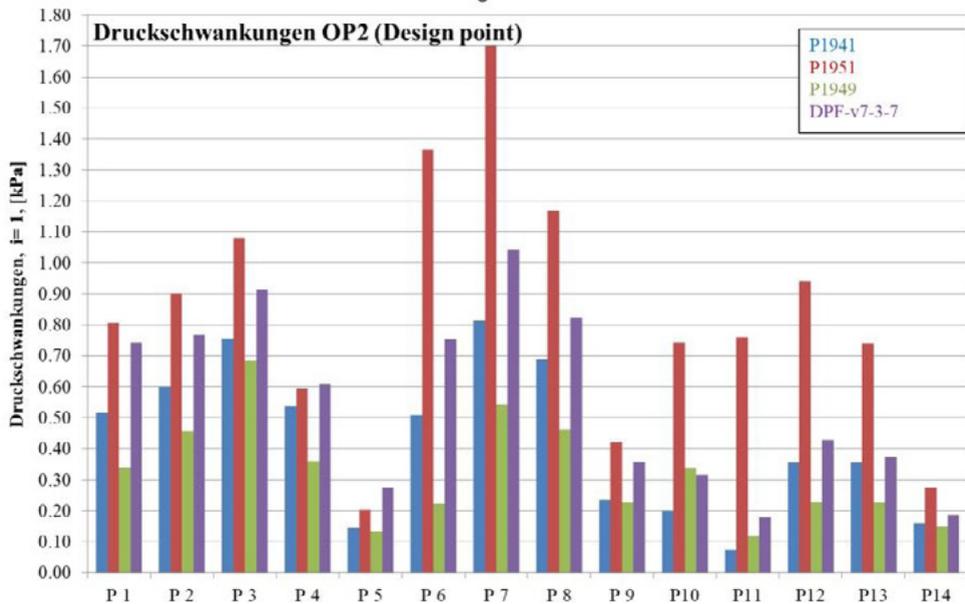


Abb. 9: Propellererregte Druckschwankungen 1. Ordnung an der SVA Megayacht

Im Hydrodynamik- und Kavitationstunnel der HSVA wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

In Abb. 10 ist der jeweilige Vergleich der Druckamplituden für die ersten 5 harmonischen Blattfrequenzen, gemessen am HCS, aufgetragen. Als erstes Ergebnis sind die Amplituden dargestellt, die nach der HSVA-Statistik für Containerschiffe dieser röße erwartet werden, danach folgen die Amplituden der untersuchten Propeller.

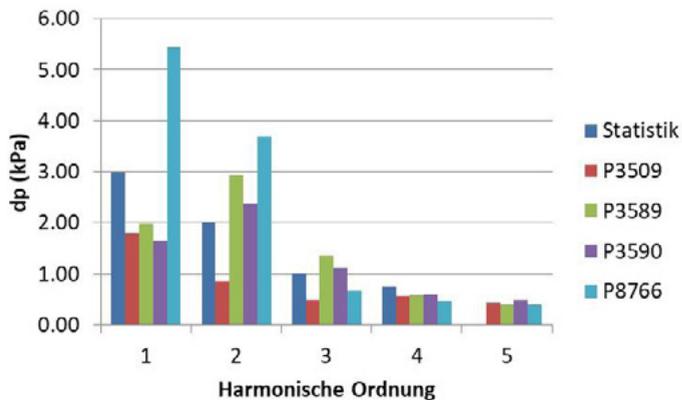


Abb. 10: maximale Propellererregte Druckschwankungen am HSVA Hamburg Container Ship (HCS)

In Abb. 11 sind die Kavitationsskizzen der Propeller für eine repräsentative Blattposition dargestellt. Interessanterweise verhalten sich die Propeller P3509, P3589 und P3590 relativ ähnlich, was die Schichtkavitation und die Druckschwankungen in der ersten Blattharmonischen angeht. Die Kavitationsbedeckung der einzelnen Propeller ist erfreulich gering. P8766 zeigt eine größere Kavitationsbedeckung und entsprechend größere Druckamplituden, was allerdings dem nennenswert kleineren Flächenverhältnis  $AE/A_0$  zuzuschreiben ist. Für ein so kleines Flächenverhältnis stellt die Kavitationsform ein sehr gutes Ergebnis dar. Die meisten Druckschwankungen sind kleiner oder in der gleichen Größenordnung als nach der Statistik erwartet, was ein weiteres schönes Ergebnis darstellt.

Die Versuche zeigen, dass die zu erwartenden Vibrationserregungen durch die Druckschwankungen der unkonventionellen Propeller nicht grundsätzlich größer sind als für vergleichbare konventionelle Propeller. Der Wirkungsgradgewinn (auch wenn er kleiner ausfällt als gewünscht) ist damit nicht grundsätzlich durch höhere Druckschwankungen erkauft. Die in dem Vorhaben gemachten Erfahrungen zeigen im Gegenteil, dass zumindest der saugseitige Tip-Rake eher einen positiven Einfluss auf die Druckschwankungen hat.

Damit konnte der Wirkungsgradgewinn ohne nachteilige Kavitationseigenschaften erreicht werden. Dies war eine Hauptbedingung der Entwurfsarbeiten.

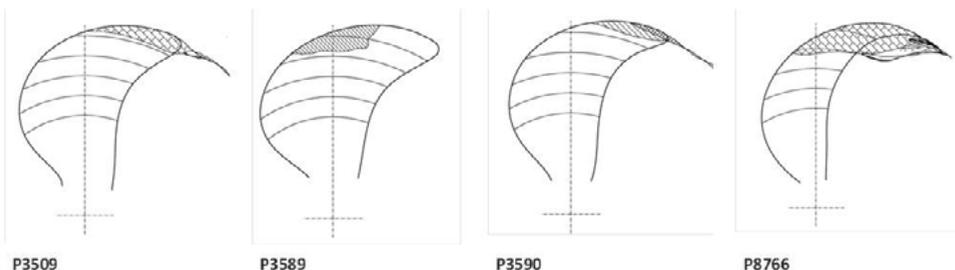


Abb. 11: Kavitationsskizzen bei Flügelstellung  $210^\circ$  am HSVA Hamburg Container Ship (HCS)

Mit Zusatzversuchen wurden detailliertere Fragestellungen bearbeitet:

- Mit Hilfe von Farbversuchen wurde die Orientierung der wandnahen Grenzschicht am Propeller visualisiert. Neben der Erkennung von laminaren und turbulenten Grenzschichtregionen wurde auch deren Orientierung bei inhomogener Anströmung (wie hinter einem Schiff), bei unterschiedlichen Turbulenzintensitäten, Reynolds-Zahlen und Propellerbelastungen (entsprechend Anstellwinkel am 2D-Flügelprofil) untersucht. Die Beobachtungen wurden zur Weiterentwicklung der viskosen Strömungsmethoden (insbesondere der Transitionsmodelle) benutzt.

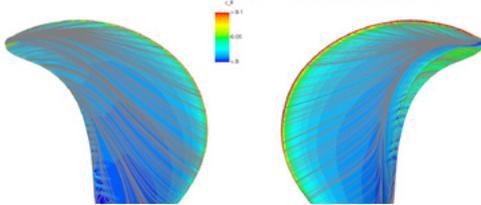
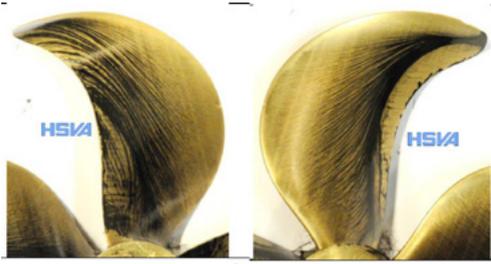


Abb. 12: Grenzschichtverläufe an P3590 am HSVA Hamburg Container Ship (HCS) – Farbversuche und RANS-Berechnungen im Modellmaßstab [4]

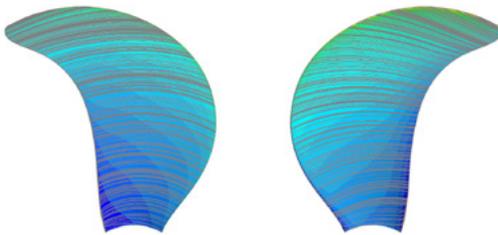


Abb. 13: Grenzschichtverläufe an P3590 am HSVA Hamburg Container Ship (HCS) –RANS-Berechnungen für die Großausführung [4]

- Die Bestimmung von Kavitationseinsatzkurven bietet ebenfalls Gelegenheit, Details der prognostizierten Druckverteilung mit Messergebnissen zu vergleichen.
- Auch die Akustikmessungen in der SVA dienen der Validierung von Prognoseverfahren, die durch bereits erlassene und in Zukunft erwartete Regularien bezüglich Lärmemissionen wachsende Bedeutung erlangen. Für die Megayacht wurden nach Umrechnung auf die Großausführung folgende Ergebnisse gefunden:
  - Bei 15 kn haben die Geräuschpegel der einzelnen Propeller bis ca. 400 Hz ein ähnliches Level.
  - Bei höheren Frequenzen streuen die Schalldruckpegel deutlich, was den Einfluss der unterschiedlichen Kavitationserscheinungen an den Propellern widerspiegelt.
  - Bei 17 kn streuen die Schalldruckpegel der einzelnen Propeller über den gesamten gemessenen Frequenzbereich.

■ In beiden Betriebspunkten überschreiten alle untersuchten Propeller die Grenzkurve SILENT-E Transit des DNV (gültig für den Nachweis einer umweltverträglichen Geräuschemission) im Terzband der 1. Flügelzahlharmonischen. Darüber hinaus treten auch vereinzelte Überschreitungen in höheren Frequenzen im Betriebspunkt für 15 kn bei den Propellern P1949 und DPF v3-7-3 auf.

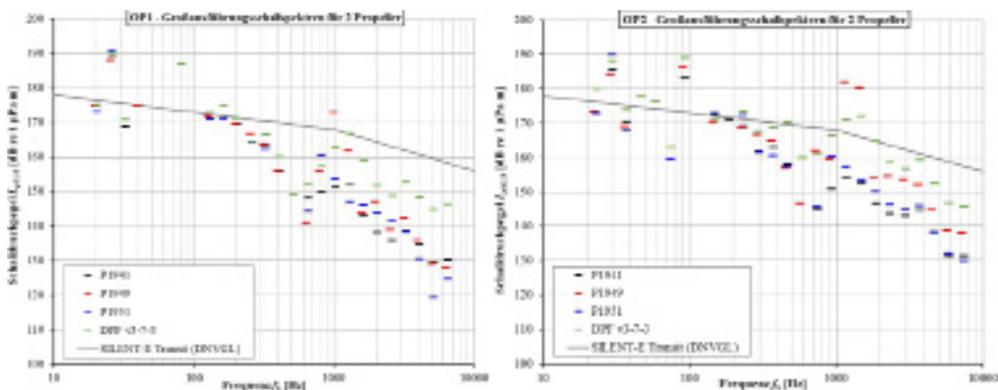


Abb. 14: Schalldruckpegelspektren an der SVA Megayacht

## 5. Entwicklung und Einsatz von Messtechniken

Der Projektpartner URO hat sein Meßsystem weiterentwickelt. Es wurden sowohl Großausführungsmessungen auf MV „Loch Seaforth“ als auch Modellmessungen in der HSVA durchgeführt.

Ausgangspunkt der messtechnischen Entwicklungen war die in vorherigen Projekten (KonKav, HYKOPS) entwickelte optische Strömungsmesstechnik für den Einsatz an realen Großausführungen. Dabei wird durch zwei oder mehr Bullaugen im Schiffsrumpf ein vergleichsweise kleines Messvolumen, in der Größenordnung von einigen Kubikzentimetern mit Laserlicht beleuchtet und der Partikelversatz in der Strömung mit Kameras beobachtet (PTV – Particle Image Velocimetry). Aufgrund der großen Entfernungen von einigen Metern, der oft schlechten Sicht unter Wasser und der begrenzten Laserleistung kann die Strömung nicht global erfasst werden, sondern das Strömungsfeld muss über Traversierungen von Laser und Kamera lokal abgetastet werden (punktuelle PTV-Technik). Um die bisherigen Rüstzeiten der Messtechnik von ca. einer Woche zu verringern, den Einbau der Messtechnik für verschiedene Einsatzszenarien variabler zu gestalten und die Bedienung zu erleichtern wurde die Mechanik, Optik und Elektronik das Gesamtsystem neu konzipiert und automatisiert. Im Ergebnis ist ein Messsystem entstanden, welches auf die Bullaugen im Schiffsrumpf direkt aufgesetzt werden kann und die Messpunkte im Nachstromfeld automatisiert anfährt (siehe Abbil-

dung 15). Auf den Fotos ist das System im Labor (oben, Mitte) und während der Messkampagne im Einsatz auf der Loch Seaforth (unten) gezeigt. Durch Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera werden auch zeitaufgelöste Messungen möglich, die allerdings stark von der Partikelkonzentration und Wasserqualität abhängen. Das Messsystem wurde in einer Messkampagne zur phasenaufgelösten Messung der Propellerumströmung an der Loch Seaforth eingesetzt. Aufgrund der Corona-Pandemie konnte die Messtechnik nicht auf der beim Projektstart avisierten Großausführung, installiert werden. Weiterhin waren die Messungen auch erst gegen Ende des Projektes möglich, so dass schlechte Wetterbedingungen in Kauf genommen werden mussten. Nichtsdestotrotz konnten Strömungsmessdaten im Bereich des Propellers erfasst werden und die angestrebte Funktionsfähigkeit bei Verbesserung der Rüst- und Messzeit demonstriert werden.

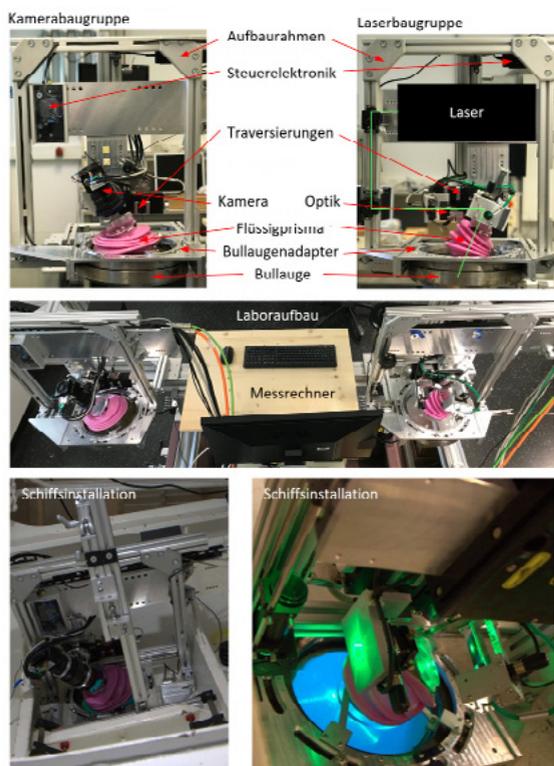


Abb. 15: Realisierte modular aufgebaute optische Strömungsmesstechnik für Großausführungen (oben Kamera und Laserbaugruppe im Labor, Mitte Gesamtsystem im Labor, unten Baugruppen bei Großausführungsmessungen)

Parallel zum komplexen Aufbau der PTV-basierten optischen Messtechnik mit zwei optischen Zugängen wurde eine im Projekt HyDesign für Strömungsmessungen im Modellmaßstab entwickelte optische Messtechnik, welche nur einen und vergleichsweise kleinen optischen Zugang (ca. 5cm Durchmesser) benötigt, für Großausführungsmessungen adaptiert. Die Messtechnik basiert auf der defokussierten Abbildung von Partikeln in direkter Rückwärtsstreuung. Aus den defokus-

sierten Abbildungen wurden entlang der eindimensionalen Laserbeleuchtung zwei Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit bestimmt (1D-2C-Messtechnik). In Abbildung 16 sind der prinzipielle Aufbau (links), die Messtechnik im Labor (Mitte) und bei Messungen an nur einem Bullauge während der Großausführungsmessungen (rechts) zu sehen.

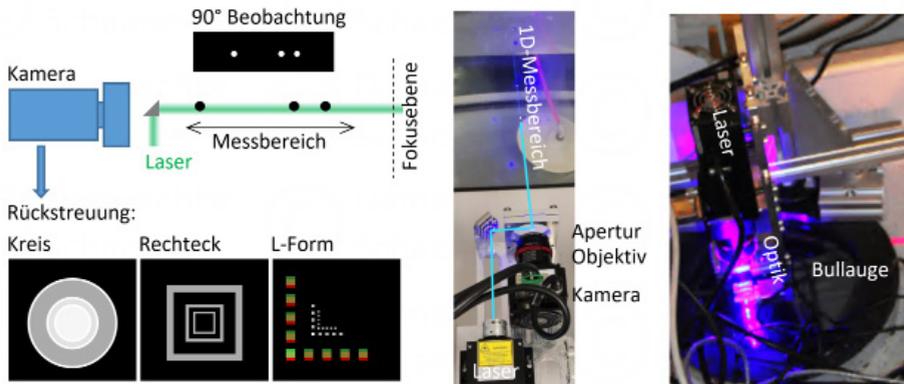


Abb. 16: Mehrdimensionale optische Strömungsmesstechnik mit nur einem optischen Zugang basierend auf defokussierten Abbildungen (links Prinzip, Mitte Laboraufbau, rechts Schiffsmessungen)

## 6. Ergebnisse

Die Optimierungsergebnisse zeigen, dass das Neigen des Hangs zur Saugseite die Effizienz verbessert, aber das Risiko von Kavitation erhöht. Dies ist auf einen lokalen Anstieg des effektiven Anstellwinkels an der Flügelspitze zurückzuführen, der den Schub und die Effizienz erhöht, wobei jedoch die Wahrscheinlichkeit von Blaskavitation auf der gekrümmten Saugseite zunimmt. Hingegen führt das Neigen des Hangs zur Druckseite zu einer deutlichen Verringerung der Kavitationsintensität, allerdings auf Kosten einer geringeren Propellereffizienz im Vergleich zum konventionellen Entwurf.

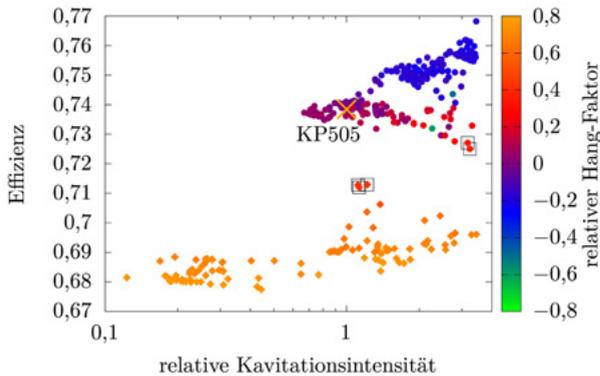


Abb. 17: Flügelhang als maßgeblicher unkonventioneller Formgebungsparameter

Die Modellversuche bestätigen diese Ergebnisse und zeigten darüber hinaus, dass mit unkonventionellen Propellern der Wirkungsgrad verbessert werden kann, ohne Einbußen im Kavitationsverhalten oder in der Vibrationsanregung in Kauf nehmen zu müssen. Die Höhe der Wirkungsgradverbesserungen lag jedoch noch unter den selbst gesteckten Zielen, was durch die mangelnde Erfahrung im Entwurf dieser komplexen Formen erklärbar ist.

Die Untersuchung der Maßstabeffekte in den RANS-Simulationen zeigte, dass der Einsatz von Transitionsmodellen entscheidend ist, um die physikalischen Zusammenhänge der Strömung mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen. Bei niedrigen Reynolds-Zahlen hat die Strömung einen großen laminaren Anteil, aber das Standard-Turbulenzmodell geht von einer vollständig turbulenten Strömung aus, was zu Ungenauigkeiten führt. Diese Unzulänglichkeit kann durch die Einbeziehung eines Transitionsmodells behoben werden. Die Maßstabeffekte erwiesen sich für die beiden untersuchten Propeller als sehr gering. Ein Anstieg des Schubs bei der Großausführung von 0,3 % bis 0,45 % wird durch einen entsprechenden Anstieg des Drehmoments um 0,45 % bis zu 1 % ausgeglichen, was einen nahezu identischen Wirkungsgrad bei Reynolds-Zahlen für Modell- und Großausführungsmaßstab zur Folge hat.

Innerhalb von CAESES wurden KI-Modelle trainiert, die für vorgegebene Betriebsbedingungen optimierte Propeller verwendeten [6]. Propellergeometrien, die anschließend für andere Betriebsbedingungen mit diesen KI-Modellen erstellt worden sind, konnten in nachgeschalteten, direkten Optimierungen nur noch unwesentlich verbessert werden. Das Verbesserungspotential lag bei allen untersuchten Propellern unter 0,5 %.

## **7. Zusammenfassung**

Die Entwurfsumgebung wurde für unkonventionelle Propeller, wie hier den Tip-Rake Propeller, erweitert, um die Geometriebeschreibung mit zwei zusätzlichen Orientierungswinkeln für die Anordnung der Flügelprofile im Raum zu ermöglichen. Die Eignung konnte während des Vorhabens gezeigt werden. Einschlägige und notwendige Erfahrungen konnten während des Vorhabens gesammelt und im Austausch unter den Projektpartnern diskutiert werden.

Die zur Verfügung stehenden Paneel- und RANS-Verfahren sind auf konventionelle und unkonventionelle Propeller angewendet und getestet worden. Dies gilt sowohl für das implementierte Transitionsmodell, das im Modellmaßstab Anwendung fand, als auch für die voll turbulenten Berechnungen für die Großausführung. Unter geeigneten Umständen konnten gute Ergebnisse erzielt werden.

Die Modellversuche zeigten, dass einerseits ein Wirkungsgradgewinn ohne eine Verschlechterung anderer wichtiger Eigenschaften möglich ist, dass andererseits aber auch noch Erfahrungen im Entwurf unkonventioneller Propeller gesammelt werden müssen, um das volle Potential dieses Konzepts nutzen zu können. Mit Hilfe der entwickelten Methoden stehen den Industriepartnern mittelfristig zusätzliche Entwurfs- und Analysewerkzeuge zur Verfügung, welche es ermöglichen unkonventionelle Propellergeometrien bei Bedarf am Markt verstärkt zu nutzen. Die in CAESES entwickelte Methodik, ein KI-basiertes Entwurfssystem mit optimierten Propellergeometrien zu trainieren, funktioniert offensichtlich für die schnelle Erzeugung sehr guter Propeller im Rahmen der Prognosequalität der darunterliegenden Simulationen hervorragend.

## **Danksagung**

Die Projektpartner bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Verbundprojektes und beim Projektträger Jülich für die kompetente Betreuung.

## Literatur

- [1] Asif, A., Kleinsorge, L., Goedicke, T. (2024). Optimisation of Unconventional Tip-Rake Propeller using Panel Code Method in Proceedings of the Eight International Symposium on Marine Propulsors (smp'24), Berlin, Germany
- [2] Asif, A., Kleinsorge, L., Greitsch, L. (2023). A Contribution to the design and numerical evaluation of Unconventional Tip-Rake Propeller in Proceedings of the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE), Ottawa, Canada
- [3] Lücke, T. , "Design of unconventional Propellers for the HSVA Hamburg Container Ship (HCS)", Eighth International Symposium on Marine Propulsors, smp'24, Berlin, Germany, March 2024
- [4] Rubino, G., Abdel-Maksoud, M. (2024). Model- and Full-Scale Tip-Raked Marine Propellers: Analysis of the Scale Effects in Open Water Conditions. In: Proceedings of the Eight International Symposium on Marine Propulsors (smp'24), Berlin, Germany
- [5] J. C. Neitzel-Petersen, D. Ferreira-Gonzalez, R. Gosda und M. Abdel-Maksoud. „A two-stage optimization approach for propellers with unconventional blade shape in a wake field using BEM“. In: Seventh International Symposium of Marine Propulsors (2022).
- [6] A. Arapakopoulos, C. Abt, S. Hauschulz, S. Harries. "Optimization and Surrogate Modeling of Tip-Rake Propellers". In: Proceedings of the Eight International Symposium on Marine Propulsors (smp'24), Berlin, Germany



# FlexiGen

## Flexible und effiziente Generierung von unikaten Schiffsbauanteilen mittels eines innovativen laserunterstützten additiven Fertigungsprozesses

### Autorenliste

Kai Biester, M.Eng	Laser Zentrum Hannover e.V.
Nick Schwarz, M.Sc.	Laser Zentrum Hannover e.V.
Dr.-Ing. Jörg Hermsdorf	Laser Zentrum Hannover e.V.
Prof. Dr.-Ing. Stefan Kaierle	Laser Zentrum Hannover e.V.
Dr.-Ing. Ulrich Prank	Merkle Schweißanlagen - Technik GmbH
Dr.-Ing. Sörn Ocylok	Laserline GmbH
Dr.-Ing. Richard Banaschik	MEYER WERFT GmbH & Co. KG
Dr.-Ing. Florian Wagner	Gall & Seitz Systems GmbH

---

### 1. Einleitung und Motivation

Die Schiffbauindustrie wird heutzutage vor diverse Herausforderungen gestellt, deren Lösungsansätze verschiedene Aspekte moderner Forschung betreffen. Zum einen steht im Sinne der Nachhaltigkeit der Aspekt von ressourcenschonender Herstellung von Schiffbauteilen über die gesamte Wertschöpfungskette vermehrt im Fokus, zum anderen besteht im Rahmen globaler Rohstoffknappheit der Bedarf, bestehende Gestaltungsparadigmen anzupassen und Bauteile neu zu denken. Dazu wurde im Projekt FLEXIGEN durch das Konsortium bestehend aus der MEYER WERFT GmbH & Co. KG, der Gall & Seitz Systems GmbH, der Laserline GmbH, der Merkle Schweißanlagen-Technik GmbH und dem Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) eine neue Fertigungsmethodik zur flexiblen additiven Herstellung von Schiffbauteilen untersucht und weiterentwickelt. Durch die führenden Unternehmen in Industrie und Forschung wurde so von der Laserstrahlquellenentwicklung über die Prozessentwicklung bis hin zur Anlagenintegration und Demonstration an Funktionsmustern ein umfassender Teil der Herstellungskette betrachtet.

Heutzutage wird aufgrund der Komplexität der Schweißanforderungen im Schiffbau auf konventionelle Schweißprozesse zurückgegriffen, deren prozessbedingte hohe Wärmeeinbringung sich bei geringen Wandstärken, die im Rahmen der Gewichtsoptimierung von Bauteilen notwendig sind, durch resultierende Verformungen und Deformationen nachteilig auswirkt. Nachgelagerte zeit- und energieintensive richttechnische Verfahren müssen derzeit nach dem Schweißen

eingesetzt werden, um die geforderte Maßhaltigkeit zu erzielen. Vorhandene Potentiale zur Gewichtsreduktion können daher bislang nur unzureichend ausgenutzt werden.

Durch den Einsatz additiver Verfahren können die Möglichkeiten zur Gewichtsreduktion, welche individuelle Verstärkungs- und Aussteifungsstrukturen bieten, ausgenutzt werden. Die gezielte Auswahl der eingesetzten Werkstoffe hinsichtlich benötigter mechanischer Eigenschaften und die konsequente Ausnutzung der konstruktiven Möglichkeiten eines additiven Fertigungsverfahrens erschließen bislang ungenutzte Potentiale im Leichtbau sowie der Ressourceneinsparung im Zerspanungsprozess. Hierbei kommt eine Kombination zur Auslegung belastungsgerechter Verstärkungen mittels digitaler Produktion und deren schweißtechnische Realisierung durch individuell optimierte Wandstärken mittels additiver Verfahren zum Einsatz.

Ziel dieses Vorhabens war es, durch die Entwicklung eines effizienten hybriden Fertigungsverfahrens, welches den bauteiltechnischen Anforderungen wie z. B. Geometriefreiheit, Maßhaltigkeit und Wärmeeintrag, sowie den verfahrenstechnischen Vorgaben hinsichtlich Aufbaurate gerecht wird die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Schiffbaus im internationalen Vergleich zu steigern und Bereiche der Wertschöpfungskette langfristig in Deutschland anzusiedeln. Der zielgerichtete und ressourceneffiziente Einsatz von Werkstoffen und Energie zur Herstellung von Leichtbaustrukturen leistet einen langfristigen Beitrag zum umweltschonenderen Schiffsbetrieb durch Reduzierung der erforderlichen Antriebsenergie.

## **2. Spezifikation und Demonstratorgeometrien**

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und der Klassifikationsgesellschaft (DNV) kam es zur Erstellung einer Spezifikation aller technisch relevanten Randbedingungen für den Einsatz im werftnahen Umfeld. Hierbei kam es unter anderem zur Festlegung der genauen Beschreibung der benötigten Schweißraupengeometrien, möglichen Anwendungen in der tragenden Schiffsstruktur aber auch zu konkreten Anforderungen an die Maßhaltigkeit von Bauteilen und weiteren Aspekten der Geometrietreue. Neben der genannten Spezifikation wurden relevante Demonstratorbauteile identifiziert und in ersten Schritten sowohl erste Bemessungskonzepte, als auch eine erste fertigungstechnische Umsetzung im Labor der MEYER WERFT realisiert (siehe Abb. 1 a)). Es stellte sich heraus, dass sich das Beispiel einer lokalen Strukturversteifung besonders gut als Demonstratorbauteil eignet (Abb. 1 a)). Diese Bauteile weisen einen erheblichen Montageaufwand auf und erzeugen somit signifikante Kosten in der Vorfertigung des Sektionsbaus. Neben der Montagetätigkeit kann durch eine additive Fertigung des Bauteils die Wertschöpfung bei der Herstellung der Verstärkung wieder an den Standort in Papenburg gebracht werden. Zusätzlich ist man in der Lage, eine beanspruchungs-

gerechtere Auslegung der Strukturen durchzuführen und gewinnt damit an konstruktiven Freiheitsgraden.

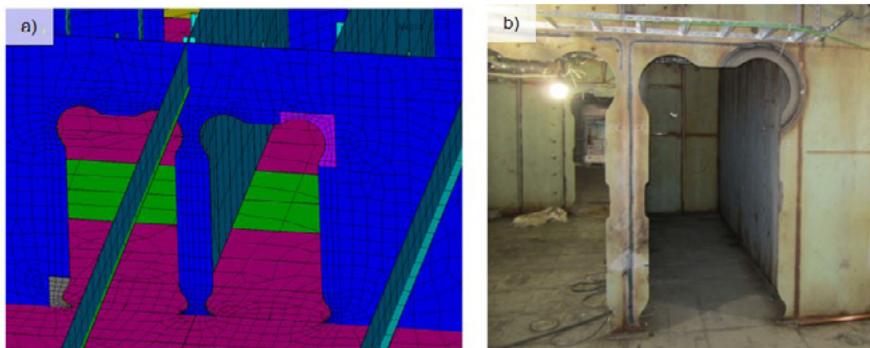


Abb. 1: Demonstratorgeometrie Türeckverstärkung in der vernetzten Darstellung der Simulation (a) und im verbauten Zustand nach der Montage (b)

### 3. Entwicklung eines Diodenlasersystems mit variabler Brennfleckform

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde bei Laserline ein Diodenlaser mit einer Ausgangsleistung von 18 kW in Verbindung mit einer Strahlqualität von 66 mm\*mrad bei einer Wellenlänge von 920-1060 nm realisiert (siehe Abb. 2 a)). Für die Strahlführung wurde eine neuartige Lichtleitfaser mit einem Faserkern-durchmesser von 600  $\mu\text{m}$  realisiert, welche über eine Bruchüberwachung, eine Temperatur- sowie eine Streulichtsensorik verfügt und in die Steuerung und Visualisierung des Lasers eingebunden ist. Die neu entwickelten Sensoriken erlauben sowohl die Aufzeichnung von Prozessdaten als auch die Dokumentation des Status der Laserstrahlquelle.

Um eine variable Anpassung des Lasers an die Prozessführung zu ermöglichen, wurde eine Zoom-Optik aufgebaut, die über eine geeignete Kühlung verfügt, um die optische Leistung von 18 kW dauerhaft zu übertragen. Mit Hilfe der Zoom-Optik wird die Möglichkeit geschaffen, den Brennfleck des Lasers in der Größe zu verändern, damit variable Fokusabmessungen bis zu 45 mm Länge erzeugt werden können. Eine Prinzipdarstellung der Strahlformung sowie die aufgebaute Zoom-Optik sind in Abb. 2 b) und c) dargestellt.

Eine Geometrieerfassung der Schweißnaht wurde mittels optischer Kohärenztomographie (OCT) realisiert und erlaubt die Digitalisierung von geschweißten Strukturen mit einer Scanrate bis zu 100 kHz und einer max. Auflösung von ca. 40  $\mu\text{m}$  in Spurbreiten- und -höhenrichtung. Ein Beispiel einer erzeugten Schweißnaht sowie einer Vermessung dieser mittels OCT sind in Abb. 3 dargestellt. Mithilfe dieser optischen Messtechnik kann die Schweißnahtgeometrie im Rahmen der Prozessüberwachung dokumentiert werden und stellt durch Ihre

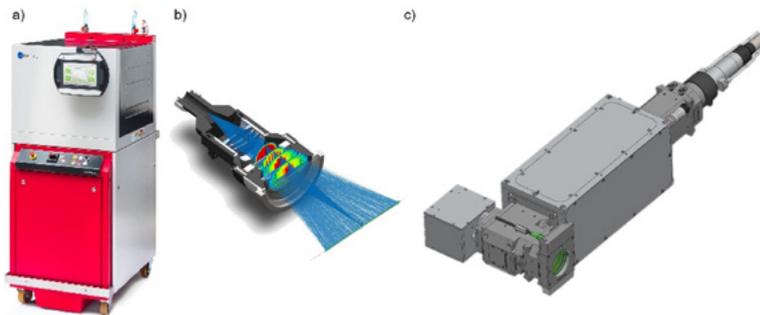


Abb. 2: Diodenlaserstrahlquelle (a), Prinzipdarstellung der Strahlformung (b), Optik mit variabler Brennfleckform und eingebundenem OCT (c)

positions aufgelöste Geometrieinformation einen wesentlichen Schritt in die Digitalisierung des Prozesses zur weiteren Verwendung in digitalen Schatten oder Zwillingen dar.



Abb. 3: Mittels Auftragsschweißen erzeugte Schweißnaht (a) und Darstellung der Vermessung der Naht mittels OCT Sensor in einer 3D-Punktewolke (b)

#### 4. Laserunterstütztes Doppeldraht Auftragsschweißen mit nichtübertragenem Lichtbogen

Zentrales Element des Projektes war ein additives Fertigungsverfahren, welches am Laser Zentrum Hannover e.V. im erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojekt “HoDopp” (Förderkennzeichen 02PK2262 - 02PK2265) experimentell entwickelt wurde. Das laserunterstützte Doppeldraht-Auftragschweißen mit nicht übertragenem Lichtbogen (LDNA-Verfahren), welches hohe Abschmelzraten erreicht, wurde im Projekt “HoDopp” für die Beschichtung von Aufspannplatten für Gussformen eingesetzt [1,2]. Im Rahmen des aktuellen Vorhabens wurde die Erweiterung des Anwendungsfeldes vom Beschichten hin zur flexiblen additiven Fertigung von wandartigen Strukturen für den Einsatz in einer werftnahen Umgebung untersucht. Hierfür kamen zwei Prozessvarianten zum Einsatz, auf die im Folgenden eingegangen wird.

#### 4.1. Scannerbasierte Steuerung des Schmelzflusses

Die Verfahrensvariante mit scannerbasierter Steuerung des Schmelzflusses basiert auf einem Lichtbogen, der zwischen zwei abschmelzenden Drahtelektroden (siehe Abb. 4) brennt. Beide Drähte werden stetig gefördert und der abgeschmolzene Zusatzwerkstoff gelangt unter Schwerkrafteinfluss auf die Bauteiloberfläche, auf welcher er erstarrt. Mittels eines Laserstrahls ist es möglich, eine gut kontrollierbare lokale Erwärmung der abgetropften Drahtschmelze zu erreichen, um eine sichere Anbindung der Auftragschicht an den Grundwerkstoff zu erhalten [3]. Ohne den Einsatz der Laserstrahlung, welche durch eine Strahlumlenkeinheit quer zur Naht gependelt wird, prägt sich die Naht auf eine für Auftragschweißungen aufgrund der Hinterschnitte ungewünschte Weise aus.

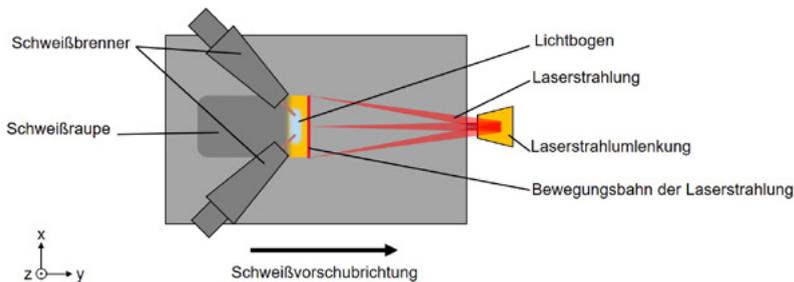


Abb. 4: Prinzipdarstellung in der Draufsicht des laserunterstützten Doppeldraht Auftragschweißens mit nichtübertragenem Lichtbogen

Für die Untersuchungen und die Auslegung des Prozesses für die Erstellung von additiven Strukturen in der Laborumgebung des LZH wurde ein Bearbeitungskopf auf Basis der Erkenntnisse des Forschungsprojektes „HoDopp“ mit einer 2D-Strahlumlenkeinheit entwickelt. Dieser Bearbeitungskopf ist in Abb. 5 a) gezeigt. Für die Verwendung des Prozesses in einer mobilen Anlage wurde in enger Abstimmung mit den Partnern ein Bearbeitungskopf entwickelt, der im Vergleich zum Bearbeitungskopf der Laborumgebung ein wesentlich reduziertes Gewicht aufweist [4]. Dieser Bearbeitungskopf, der bei den Einstellmöglichkeiten auf das Notwendigste beschränkt wurde, ist in Abb. 5 b) dargestellt. Der optische Aufbau ist statt mit einer 2D-Umlenkeinheit mit einem 1D-Galvanometerscanner für die Strahlumlenkung ausgestattet.

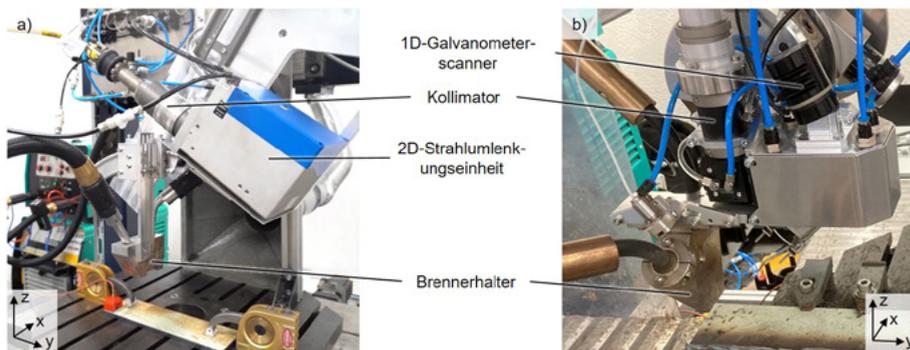


Abb. 5: Bearbeitungskopf mit scannerbasierter Steuerung des Schmelzflusses für Laborumgebung (a) und für mobile Demonstratoranlage (b)

#### 4.2. Steuerung des Schmelzflusses mit variabler Brennfleckform

Die zweite Prozessvariante verfolgt denselben Ansatz in Bezug auf die Verwendung des Lichtbogenprozesses. Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Pendelbewegung der Laserstrahlung, die durch die Strahlumlenkungseinheit umgesetzt wurde, wurde für diese Variante durch eine statische optische Einheit, welche die Brennfleckform variabel einstellen kann, ersetzt. In diesem Fall wird durch Strahlformung eine rechteckige Strahlform erzeugt, wie sie schematisch in Abb. 6 a) zu sehen ist. Die Besonderheit besteht darin, dass die Breite des Rechtecks variabel in einem Bereich von 6 mm bis 45 mm einstellbar ist. Eine resultierende Rechteckform ist in Abb. 6 b) mit Pilotlaserstrahlung, die in Arbeitsposition auf eine Substratoberfläche strahlt, dargestellt.

Der für die Demonstratoranlage entwickelte Bearbeitungskopf mit Verwendung der variablen Brennfleckform ist in Abb. 6 c) gezeigt.

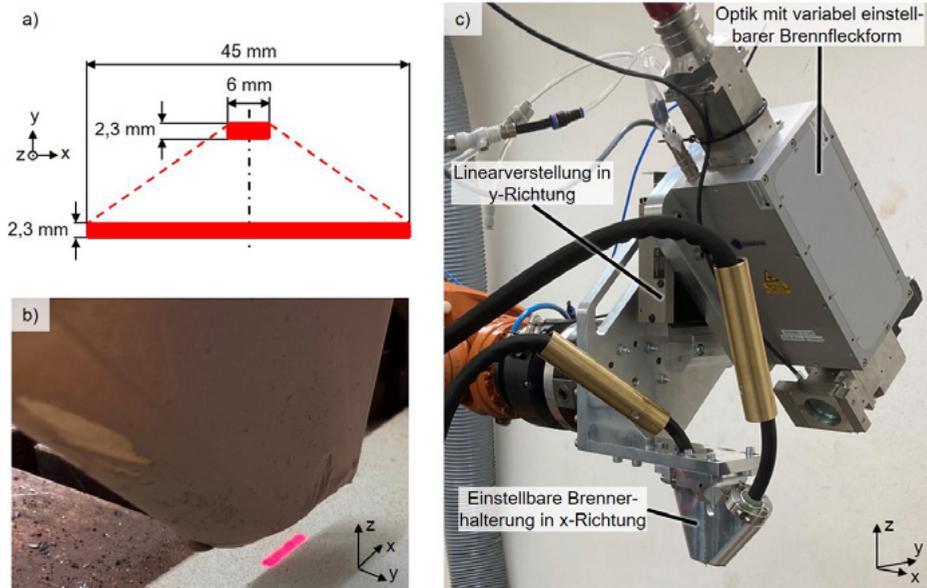


Abb. 6: Schematische

Darstellung der variabel einstellbaren Brennfleckform (a), Brennfleckform mit einer Breite von 13 mm mit Pilotlaserstrahlung (b) und Bearbeitungskopf für Optik mit variabler Brennfleckform (c)

## 5. Demonstratoranlage

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Demonstratoranlagen für unterschiedliche Anwendungsfälle entwickelt. Zum einen wurde eine Anlage für den mobilen Einsatz mit der Prozessvariante mit pendelnder Laserstrahlung aufgebaut. Zum anderen wurde eine Demonstratoranlage mit der Prozessvariante mit variabler Brennfleckform für die Untersuchung der Eignung in einer werftnahen Umgebung aufgebaut.

### 5.1. Demonstratoranlage für den mobilen Einsatz

Im FLEXIGEN-Teilvorhaben „Entwicklung einer Demonstratoranlage für das laserunterstützte Auftragschweißen mit nicht übertragenem Lichtbogen“ wurde durch die Gall & Seitz Systems GmbH in enger Zusammenarbeit mit dem Laser Zentrum Hannover e.V. eine Demonstratoranlage für den mobilen Ansatz des Verfahrens entwickelt. Dazu sind in enger Abstimmung mit allen Projektpartnern Anforderungen an einen gewichtsoptimierten Bearbeitungskopf identifiziert worden, welcher sich aufgrund seiner Adaptierbarkeit an Roboter mit geringerer Tragfähigkeit für den mobilen Einsatz im Sinne von Reparaturarbeiten von unikatigen Schiffbauteilen besonders eignet. Der resultierende Bearbeitungskopf (siehe Abb. 7 a)) wurde mit einem Gesamtgewicht von weniger als 5 kg erfolgreich in einer produktionsnahen Umgebung der Gall & Seitz Systems GmbH appliziert und zur Herstellung von Fatigue Probekörpern (Querschleiff siehe Abb. 7 b)) sowie Probekörpern zur Entnahme von Proben für zerstörende Prüfverfahren eingesetzt. Dazu

wurden die vom Laser Zentrum Hannover e.V. entwickelten Prozessparameter auf die mobile Demonstratoranlage übertragen und geringfügig auf die veränderten Umgebungsbedingungen angepasst. Somit konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die zu entwickelnde Prozesstechnik in eine mobile Anwendung implementiert werden kann und Potential für eine Weiterentwicklung der Systemtechnik für eine weitere Erhöhung des technischen Reifegrades vor allem in Bezug auf Reparaturanwendungen großskaliger Bauteile beinhaltet.

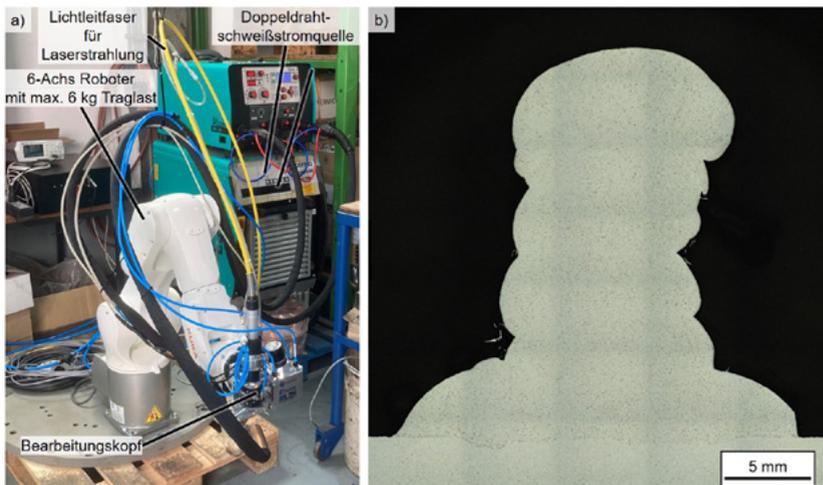


Abb. 7: Demonstratoranlage mit gewichtsoptimiertem Bearbeitungskopf für den mobilen Einsatz (a) und Querschliff eines Fatigue Probekörpers (b)

## 5.2. Demonstratoranlage mit Diodenlasersystem mit variabler Brennfleckform

Die zweite Demonstratoranlage mit der Prozessvariante mit variabler Brennfleckform hatte zum Ziel, den Fertigungsprozess sowie die Demonstratorfertigung in einer werftnahen Umgebung zu evaluieren. Hierfür wurden die zuvor durch Merkle Schweißanlagen-Technik GmbH hergestellte und für den Doppeldrahtprozess angepasste Schweißquelle in Verbindung mit der durch die Laserline GmbH entwickelten Laserstrahlquelle inklusive Strahlformungsoptik mit dem entwickelten Bearbeitungskopf in der Laborumgebung an einem Knickarmroboter des LZH in Betrieb genommen (siehe Abb. 8). Nach der Überführung und Anpassung der zuvor mit dem Bearbeitungskopf mit pendelnder Laserstrahlung entwickelten Prozessparameter und Schweißstrategien wurde die Anlage zur MEYER WERFT verbracht, um die Demonstratoranlage fertigzustellen. Die Evaluierung des Prozesses sowie die Herstellung der Demonstratorbauteile in Form der zuvor ausgewählten Türeckverstärkungen mit additiv erstellten Schweißstrukturen konnte erfolgreich durchgeführt werden.

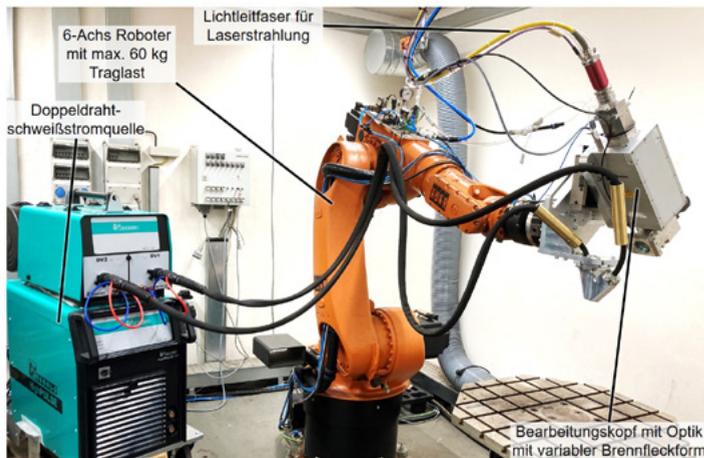


Abb. 8: Demonstratoranlage für den Einsatz in einer werftnahen Umgebung

## 6. Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurden für die Untersuchungen im Labor des LZH erfolgreich ein Bearbeitungskopf aufgebaut, mit dem eine zweidimensionale Laserstrahl-ableitung möglich ist. Im durchgeführten Projekt kamen SG3 Schweißdrähte mit 1,2 mm Durchmesser zum Einsatz. Hierfür musste zu Beginn des Projektes in enger Zusammenarbeit mit Merkle Schweißanlagen – Technik GmbH der Prozess neu eingerichtet und die im Projekt „HoDopp“ erstellte Schweißkennlinie angepasst werden, da zuvor Edelstahl-drähte zum Einsatz gekommen waren.

Zur Validierung der Umsetzbarkeit des Prozesses mit einer durch Strahlformung erzeugten Linie anstelle der pendelnden Laserstrahlung wurden zunächst Untersuchungen mit optischen Komponenten, die eine feste Linienbreite erzeugen und durch den Partner Laserline GmbH bereitgestellt wurden, durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass durch die eingebrachte Energie der Laserstrahlung mit statischer Linienform die Schmelze erfolgreich verteilt werden konnte und die Anbindung ohne nachteilhafte Hinterschnitte hergestellt werden konnte. Der Aufmischungsgrad stellt sich im Vergleich zur Prozessvariante mit pendelnder Laserstrahlung geringfügig höher dar, da mit der Linie über die gesamte Breite eine konstante thermische Energie eingebracht wird. Bei Verwendung der Strahlumlenkung kann durch die Pendelbewegung die thermische Energie auf die Anforderungen eingestellt werden, was sich für diesen Fall in den äußeren Bereichen der Schweißraupe darstellt wodurch der Aufmischungsgrad minimiert werden kann. [5] Auf Basis der erfolgreichen Validierung konnte mit dem Aufbau der Zoom-Optik von Laserline GmbH fortgefahen werden.

Auf Basis der Spezifikationen für die zu schweißenden Geometrien der additiven Struktur des Demonstratorbauteils wurden Untersuchungen zur Bestimmung der notwendigen Raupenabstände sowie Lagenversätze durchgeführt. Eine additiv erzeugte Struktur, die für die Auslegung verwendet wurde, ist in Abb. 9 a) dargestellt. Die zugehörige Schweißreihenfolge ist in Abb. 9 b) gezeigt. Der Querschliff der Struktur, der in Abb. 9 c) zu finden ist, zeigt, dass die erzeugte Struktur defektfrei und ohne Hinterschnitte hergestellt werden kann. Die entwickelten Strategien wurden zunächst mit pendelnder Strahlbewegung entwickelt und erfolgreich im Nachgang mit variabler Brennfleckform mit minimalen Anpassungen validiert. Für die simulative Auslegung der additiven Strukturen und den Nachweis, dass die erstellten additiven Strukturen den Anforderungen genügen, werden mechanische Kennwerte der Schweißgutes der additiven Struktur, das mit dem LDNA-Verfahren hergestellt wurde, benötigt. Hierfür wurden Schweißstrukturen hergestellt aus denen Probekörper für die Zugprüfung entnommen wurden. Eine solche Struktur ist in Abb. 9 d) gezeigt. Die Ergebnisse der Zugprüfung zeigen, dass die bestimmten Werte, wie bei der additiven Fertigung bekannt, je nach Ausrichtung im erzeugten Material unterschiedliche Kennwerte aufweisen. Abb. 9 e) zeigt eine Auswahl an Spannungs-Dehnungs-Diagrammen in den untersuchten Richtungen x, y und z orientiert an dem Koordinatensystem aus Abb. 9 d). Zusätzlich wurden Probekörpern mit variabler Brennfleckform hergestellt für die Untersuchung der dynamischen Kennwerte.

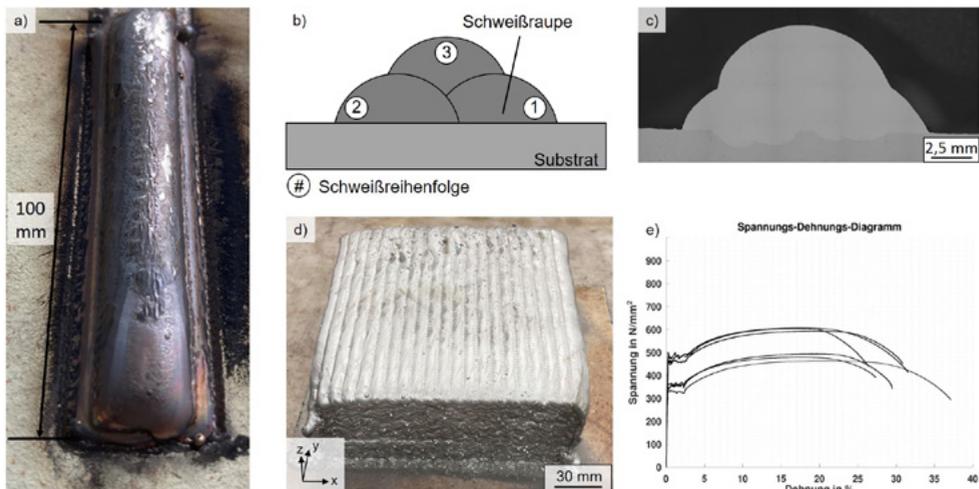


Abb. 9: Additive Struktur gefertigt mit pendelnder Laserstrahlung (a), Prinzipskizze zur Schweißreihenfolge (b), Querschliff einer additiven Struktur gefertigt mit variabler Brennfleckform (c), Struktur zur Entnahme von Probekörpern für die Bestimmung von mechanischen Kennwerten (d) und Spannungs-Dehnungs-Diagramm von additiv gefertigtem Schweißgut (e)

In enger Zusammenarbeit mit dem Partner LZH konnten geeignete Schweißfolgen und Aufbaustrategien entwickelt werden. Hierbei spielt vor allem die Bewertung nach der ISO 5817 eine wesentliche Rolle. Die geometrischen Eigenschaften spiegeln die Qualität, besonders der zyklischen Beanspruchbarkeit, wider. Entsprechende Ergebnisse werden von statischen Prüfungen des Schweißgutes und von Demonstratorbauteilen flankiert und bilden die weitere Basis (Werkstoffkennwerte) der rechnerischen Auslegung.

Es wurden verschiedene Türeckverstärkungen numerisch dimensioniert und im Labor der MEYER WERFT hergestellt. Anschließend wurde mit einem Hochleistungsplasmaschneidverfahren die Türkonturen ausgeschnitten. Das, im Gegensatz zur aktuellen Praxis, nachträgliche Ausschneiden der Türen hat positive Effekte. Zum einen kann die Steifigkeit der Schiffbauplatte genutzt werden, dem Schweißverzug entgegenzuwirken und zum anderen können die Ansatzstellen und Endkrater nachträglich entfernt werden (Abb. 10).

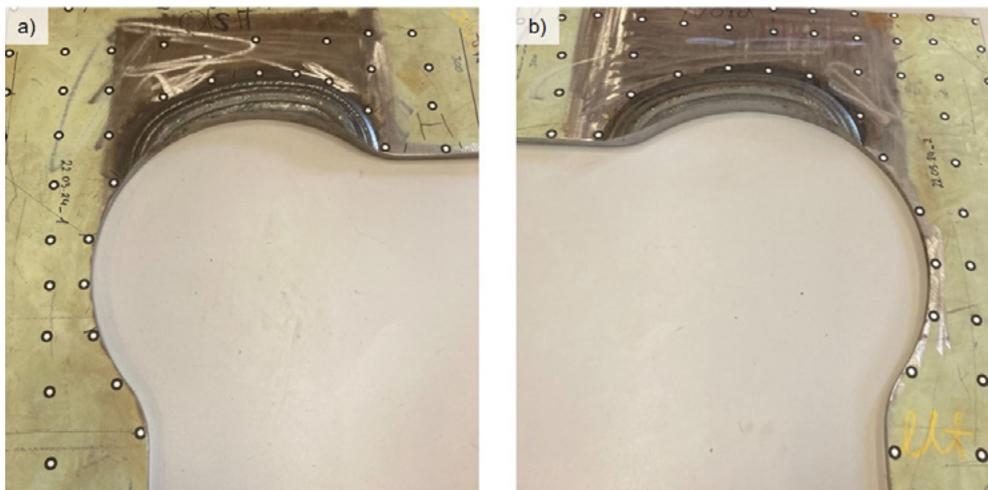


Abb. 10: Demonstratorbauteil linke Türeckverstärkung mit belastungsangepasster additiver Struktur (a), rechte Türeckverstärkung (b)

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes FLEXIGEN wurde, beginnend bei der Laserstrahlquellenentwicklung, über die Entwicklung der Fertigungsprozessparameter bis hin zur Integration der Schweißstrom- und Laserstrahlquelle, eine umfassende Weiterentwicklung des LDNA-Prozesses für die Additive Fertigung von unikaten Schiffbauteilen durchgeführt. Durch den Einsatz im werftnahen Umfeld im Rahmen von Türeckverstärkungen konnten Potentiale des Fertigungsverfahrens mit hohem Materialdurchsatz aufgezeigt werden und in ersten Demonstratorbauteilen realisiert werden. Bestimmte statische mechanische Kennwerte haben gezeigt, dass

wie im Allgemeinen in der additiven Fertigung bekannt, unterschiedliche Kennwerte abhängig von der Ausrichtung der Struktur in Bezug auf die Schweißrichtung vorliegen.

### **Danksagung**

Das Verbundprojekt „FlexiGen“ (Förderkennzeichen 03SX517) wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Hierfür möchten sich die Autoren herzlich bedanken. Der Dank gilt ebenso den Mitarbeitern des Projektträgers Jülich für die administrative und fachliche Unterstützung des Vorhabens.

## Literatur

- [1] A. Barroi, J. Hermsdorf, U. Prank, and S. Kaierle, "A Novel Approach for High Deposition Rate Cladding with Minimal Dilution with an Arc – Laser Process Combination," *Phys Procedia*, vol. 41, pp. 249–254, 2013, doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.076.
- [2] "Gemeinsamer Ergebnisbericht zum KMU-innovativ-Verbundprojekt „HoDopp: Hochleistungsauftragsschweißen mit Doppeldrahttechnik bei nicht übertragenem Lichtbogen und Laser gestützter Einbrandsteuerung“,“ 2014.
- [3] A. Barroi, J. Amelia, J. Hermsdorf, S. Kaierle, and V. Wesling, "Influence of the laser and its scan width in the LDNA surfacing process," *Phys Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 204–210, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.164.
- [4] K. Biester et al., "Development and Evaluation of a Compact Processing Head for Additive Manufacturing with Laser-Assisted Double-Wire Welding with Nontransferred Arc," in *Innovative Produktentwicklung durch additive Fertigung – Innovative Product Development by Additive Manufacturing 2023*, R. Lachmayer, M. Oel, and S. Kaierle, Eds., Berlin: Springer Vieweg, 2024.
- [5] K. Biester, A. Barroi, T. Bokelmann, M. Lammers, J. Hermsdorf, and S. Kaierle, "High deposition rate welding with a laser line optics with the laserassisted double- wire deposition welding process with nontransferred arc," *Journal of Laser Application*, vol. 042010, no. 34, 2022, doi: 10.2351/7.0000758.



# SUSY

## Gleichstrom-Energieversorgung auf Schiffen

### Autorenliste

Kurt Sommer

Tönjes Alberts

Robert Annuth

Svenja Holthus

Robert Beckmann

MEYER WERFT

morEnergy

TU Hamburg

Siemens Energy

DLR VE

### 1. Gleichstromverteilsysteme

Gleichstrombasierte Stromerzeuger und Speicher, wie Brennstoffzellen, Photovoltaik und Batteriesysteme, finden zunehmend Verwendung auf Schiffen. Viele Energieverbraucher auf Kreuzfahrtschiffen benötigen intern eine Gleichspannung, beispielsweise Beleuchtung, Entertainment und visuelle Informationssysteme. Diese Geräte müssen bisher mit zusätzlichen Gleichrichtern/Netzteilen versehen werden. Größere motorische Verbraucher sind oftmals drehzahl geregelt, hier wird vom Frequenzumformer Wechselstrom zunächst in Gleichstrom und danach wieder in Wechselstrom mit der jeweils erforderlichen Frequenz umgewandelt. Daraus ergeben sich viele Umwandlungsschritte.

Die Verbindung zwischen den gleichstrombasierten Komponenten findet üblicherweise über ein Wechselstromverteilnetz statt, sodass bei jeder Energieübertragung zwischen Gleichstromsystemen Konversionsverluste entstehen. Eine optimierte Hybridstruktur, welche die Nutzung von Wechsel- und Gleichstromverteilnetzen mit Blick auf die Gesamtsystemeffizienz zusammenführt, ist noch nicht etabliert. Bisher wird elektrische Energie auf Kreuzfahrtschiffen zentral in zwei Hauptmaschinenräumen erzeugt. Von dort aus wird die elektrische Energie in Form von Mittelspannung-Wechselstrom zu den Feuerzonenverteilungen transportiert, transformiert und im Niederspannungsnetz weiter verteilt. Das erfordert viele Umwandlungsschritte und führt zu Umwandlungsverlusten.

Im Stand der Technik existieren sowohl bei der Erzeugung elektrischer Energie als auch beim Verbrauch Wechselstrom- und Gleichstromkomponenten nebeneinander. Ein Energieaustausch findet auf der Wechselstromebene statt und nur selten wird ein kleiner gemeinsamer Gleichstromkreis genutzt. Auch gleichstrombasierte Erzeuger und Speicher – deren Bedeutung stark ansteigt – tauschen ihre

Energie derzeit mit Konsumenten über Wechselstromübertragungspfade aus. Ein Energietransport in einem Gleichstromverteilsystem wäre unter diesen Randbedingungen wesentlich effizienter.

**Der Ansatz:** SuSy stellte sich der Herausforderung, eine neue Gleichstromverteilsystemtechnik auf alle Schiffe zu adaptieren – also auch auf großen Schiffe mit großen Leistungen, die hohe Spannungen erfordern und umfangreiche, verzweigte und eventuell hybride Netzstrukturen besitzen.

Das Projekt will eine hybride Netzstruktur mit sinnvoller Kombination von Wechsel- und Gleichspannung schaffen - die zu einer reinen Gleichspannungsstruktur weiterentwickelt wird - und diese nach Gesichtspunkten der Energieeffizienz optimieren. Die Netzplanung und -konzeption dieser hybriden und reinen Gleichstromverteilsysteme setzt die simulative und praktische Untersuchung der Netze voraus. Zudem sollen auf allen Ebenen der Netze Schnittstellen vorbereitet werden, die ein einfaches Einbinden von erneuerbaren Energien oder elektrischen Speichern ermöglichen. Die bisher übliche Kopplung zwischen Wechsel- und Gleichstromverteilsystemen, die kommenden Anforderungen nicht genügt, wird untersucht und neue kostengünstige Systeme und Maßnahmen zur Kostensenkung sollen entwickelt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen haben theoretische Grundlagen für innovative Gleichstromverteilsysteme gelegt, aber die Anpassung auf die Erfordernisse in einem Schiff erfolgt in diesem Projekt. Weiterhin ist besonders der schiffstypübergreifende Ansatz zu betonen. Dieser neuartige Ansatz schafft eine breitere Basis und damit eine ausreichende Verbreitung dieser Technologien.

Es ist bereits absehbar, dass elektrische Systeme in vielerlei Hinsicht universeller und besser modular anpassbar sein müssen als sie es bisher sind. Daher besteht der Lösungsansatz aus einem Methoden- und Modellierungswerkzeugkoffer, der Vorgehensweisen anbietet, auf deren Basis eine Lösung für die jeweilige Anwendung entwickelt bzw. ausgewählt werden kann.

Für den Erfolg des Projektes und für die erfolgreiche spätere wirtschaftliche Verwertung ist es essenziell wichtig, eine Lösung zu finden, die möglichst universell auf vielen Schiffstypen anwendbar ist. Nur so lassen sich Komponentenverfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit sicherstellen.

Durch die Vielzahl an verschiedenen Schiffstypen kommt es auch zu unterschiedlichen Anforderungen, welche sich stark voneinander unterscheiden können – insbesondere:

- die Verteilung des Energiebedarfs auf unterschiedliche Verbraucher
- die räumliche Anordnung der Verbraucher
- die tageszeitlichen Lastschwankungen
- die räumliche Verteilung der Lastzentren auf einem Schiff inklusive deren tageszeitlich unterschiedlicher Verbrauchsspitzen
- die Art der Verbraucher

Daher werden verschiedene Netztopologien und Technologieansätze verwendet, um die spezifischen technischen Anforderungen der jeweiligen Anwendungen zu erfüllen.

### **Konsortium**

Zur Lösung dieser Aufgabe hat sich ein Konsortium aus Industrie und Akademie zusammengefunden. Partner des SuSy-Projekts waren die MEYER WERFT, Siemens Energy, morEnergy, Lloyd's Register EMEA, das DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme und die TU Hamburg (TUHH) mit den Instituten für Mechatronik im Maschinenbau und für Elektrische Energietechnik. Damen Shipyards und Schneider Electric waren als assoziierte Partner beteiligt.

## **2. Netztopologie**

### **2.1. Verteilungskonzept**

Das SuSy-Energieverteilungskonzept beinhaltet die Anordnung mehrerer dezentraler DC-Energiequellen, sogenannte „Power Units“ (PU), in jeder Feuerzone. Dadurch wird jede Feuerzone unabhängig von den anderen Feuerzonen mit Energie versorgt. Zusätzlich kann jede Feuerzone durch eine Verbindung zur Mittelspannungsebene (der Hauptverteilung) durch Energie vom Hauptantrieb gespeist werden. Ebenfalls genutzt wird diese Mittelspannungsebene bei einem Ausfall der Energieversorgung innerhalb einer Feuerzone. In diesem Fall kann die betroffene Feuerzone von den benachbarten Feuerzonen über die Mittelspannungsebene mit Energie versorgt werden.

Innerhalb einer Feuerzone gibt es zwei vertikal verlaufende bipolare +/- 350 V (700 V) DC-Sammelschienen. Von diesen Sammelschienen werden auch die Verteilungen zu den einzelnen Decks versorgt. Über 700V DC werden die technischen Bereiche und die Hilfssysteme im Maschinenraum gespeist. Der Kabinenbereich hingegen wird durch eine 350 V DC Verteilung versorgt. Das bedeutet es gibt 3 verschiedene DC-Hauptspannungsebenen zur Verteilung der Energie auf Schiffen:

- 6 kV DC: für die Hauptverteilung auf dem Schiff und Verbindung der Feuerzonen
- 700 V DC: Unterverteilung innerhalb der Feuerzonen  
(Einspeisung der Power Units), technische Bereiche und Maschinenraum
- 350 V DC: Einspeisung der Kabinen- und öffentliche Bereiche

## 2.2. Feuerzonennetz

Eine Feuerzone setzt sich aus technischen, öffentlichen und Kabinenbereichen zusammen. Diese werden durch zwei vertikal verlaufende 700 V DC-Sammelschienen (in Abb. 1 in blau und in gelb markiert) versorgt. Eine dieser Schienen ist gekapselt, sodass bei einem Fehlerfall, z. B. Feuer oder Wassereintrich, immer eine der beiden Schienen die unterschiedlichen Bereiche versorgt. Das Netz im Technischen Bereich ist als IT-Netz (Isolé Terre) ausgelegt. Um hier den Schutz der horizontalen Verteilung sicherzustellen wird diese durch schnelle Halbleiterschalter (SSCB's-Solid State Circuit Breaker) und Trenner im Fehlerfall isoliert. Bei einem Ausfall von einer vertikalen Verteilschiene wird der technische Bereich über die zweite vertikale Schiene versorgt. Da eine technische Verteilung die technischen Verbraucher mehrerer Decks versorgt, hängt die Gesamtanzahl der technischen Verteilungen pro Feuerzone von der benötigten Leistung der technischen Verbraucher ab. In den Technikbereichen sind alle Komponenten untergebracht, die für die Klimatisierung, die Wasserversorgung, die Abfallentsorgung, den Wellnessbereich, etc. und die Energieverteilung notwendig sind. Aus diesen Technikbereichen werden auch die Notverbraucher wie Notlüfter und Notlenzpumpen durch dezentral angeordnete Batteriespeicher versorgt.

Die Kabinenbereiche werden mit 350 V DC als TN-Netz (terre neutre) versorgt. Sie sind von beiden Seiten jeweils über zwei unabhängige isolierte DC/DC-Wandler versorgt, sodass ein Einspeisesystem von jeder vertikalen Stromschiene gewährleistet ist. In den Kabinenbereichen befinden sich die Passagierkabinen sowie die Crew-Kabinen. Größere Verbraucher, die nicht in direktem Zusammenhang mit der Passagierbetreuung stehen, werden nicht aus der Kabinenverteilung gespeist. Auch hier werden die Notverbraucher wie die Notbeleuchtung für die Treppenhäuser und öffentliche Bereiche durch dezentral angeordnete Batteriespeicher versorgt.

Jede horizontale Verteilung verfügt über einen eigenen Decks-Controller, der von einer übergeordneten Prozessereinheit gesteuert wird. Der Decks-Controller steuert mit der Droop Control Funktion im Falle eines Ausfalls des Kommunikationssystems die horizontalen Verteilungen, sodass diese unabhängig von den anderen horizontalen Verteilungssystemen arbeiten. Um zusätzlich größte

mögliche Sicherheit und eine galvanische Trennung zu gewährleisten ist ein mechanischer Trennschalter zwischen den horizontalen (technische- und Kabinenbereiche) und dem vertikalen Sammelschienensystem installiert.

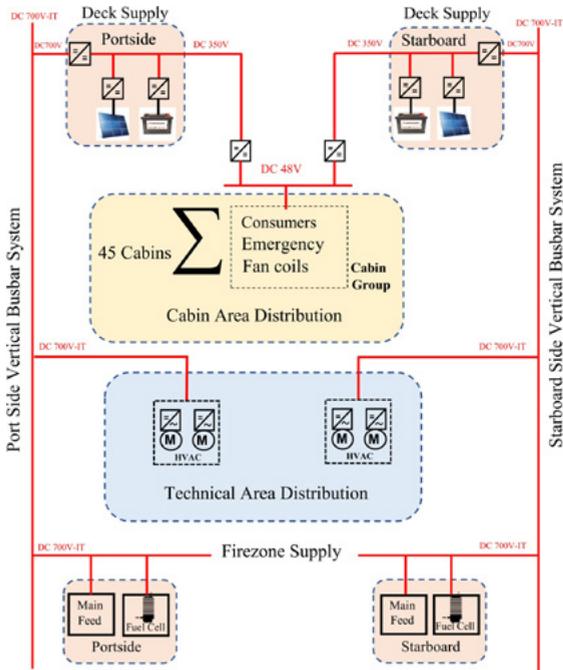


Abb. 1: Mögliches Single Line Diagramm einer DC Verteilung in einer Feuerzone

### 2.3. Kabinenverteilung

Die Kabinenverteilung-Sammelschienen haben zusätzlich zur Versorgung der Kabinen auch eine Notstromfunktion. Wichtige Kabinenverbraucher werden durch lokale Batterien in der Deckverteilstation versorgt.

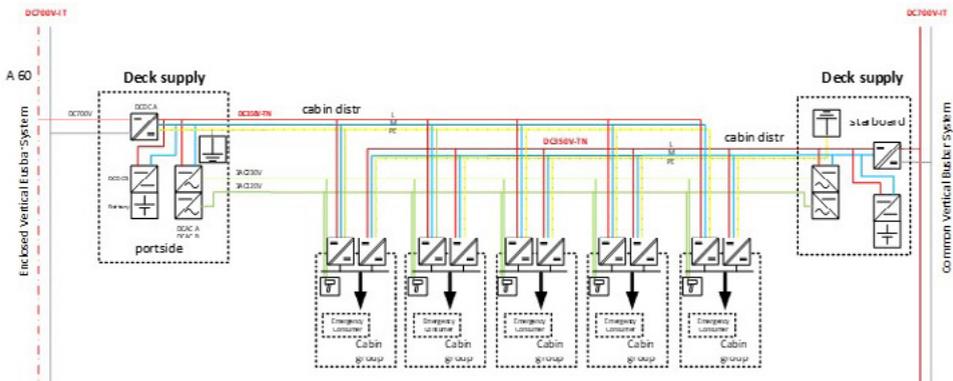


Abb. 2: Möglichkeit für redundante Kabineneinspeisung

Die Nennspannung der Kabinenverteilung beträgt 350 V DC als TN-Netz und jede Kabine verfügt über zwei unabhängige Versorgungen.

In der Kabinenverteilung werden auch Kleinverbraucher bis zu 2 kW erwartet, die vom Kunden an Bord gebracht werden. Diese Verbraucher nutzen je nach Einsatzmarkt 230 V AC oder 120 V AC. Zwei DC/AC-Wechselrichter, einer für die Versorgung mit 230 V/50 Hz und einer für die Versorgung mit 120 V/60 Hz sind ebenfalls in der Deckversorgung (im Bild als „Deck Supply“ zu erkennen) installiert. Bei einem schwerwiegenden Fehler auf der Ausgangsseite eines DC/DC-Wandlers in den Kabinenbereichsverteilungen schaltet der DC/DC-Wandler ab und trennt die zugehörige horizontale Sammelschiene vom zugehörigen vertikalen Sammelschienensystem. Bei einem Ausfall der Eingangsstufe eines DC/DC-Wandlers wird die eingangsseitige Sicherung auslösen und dieser fehlerhafter DC/DC-Wandler vom dazugehörigen vertikalen Verteilungssystem getrennt. In allen oben genannten Fällen wird die Kabinenverteilung weiterhin aus dem nicht betroffenen horizontalen und vertikalen Sammelschienensystem gespeist.

Bei einem Ausfall des vertikalen Sammelschienensystems werden die nicht benötigten Verbraucher abgeschaltet. Die Notverbraucher im Kabinenbereich wie z. B. Etagenlicht, Fluchtwegschilder, Kommunikationssystem, etc. werden von den Batterien im Schaltschrank auf beiden Seiten der Kabinenverteilung gespeist, in denen auch die DC/DC-Wandler installiert sind.

#### **2.4. LV/MV Verbindung**

Ein MV-Ringnetz verbindet die entsprechenden Feuerzonen mit der MVDC-Hauptverteilung. Die MV-Verbindung zu jeder Feuerzonenverteilung wird über einen isolierten bidirektionalen MV-LV-Gleichstromwandler (DC/DC-Wandler) mit einem SSCB realisiert, der oberhalb des sogenannten Schottendecks an wechselnden Seiten des Schiffes installiert ist. Über diese MV/LV-Verbindung können die Feuerzonen des Schiffes die Last untereinander aufteilen, und während die MV-Generatoren laufen, wird die überschüssige Leistung des MV-Antriebssystems an die Feuerzonen geliefert. Dadurch können die Batterien der „Power Units“ geladen werden und ggfs. Brennstoffzellen abgeschaltet werden, sodass die Hauptmaschinen im optimalen Arbeitspunkt gefahren werden können.

Die LV-Verbindung vom Gleichstromwandler ist über SSCBs mit beiden vertikalen Sammelschienen innerhalb der Feuerzone verbunden. Im Falle eines Ausfalls einer vertikalen Sammelschiene trennt das SSCB auf der fehlerhaften Seite die Verbindung von der vertikalen Sammelschiene und speist weiterhin Strom in die nicht betroffene vertikale Sammelschiene. Darüber hinaus sind auch die Notverbraucher (z. B. Feuerlöschpumpe, Notruderanlage, Notlenzpumpe) an diese Verbindung angeschlossen. Die Notverbraucher können entweder von der LV-Ver-

teilung im Maschinenraum oder von den Feuerzonen über die MV-Verbindung versorgt werden. Dies führt zu einer hohen Verfügbarkeit der Stromversorgung für die Notstromverbraucher. Die Notstromverbraucher mit geringer Leistung werden von den jeweiligen lokalen Batterien in der Decksverteilung versorgt. Bei einem Ausfall auf der Mittelspannungsseite schaltet sich das MV-Schaltnetzteil auf der Mittelspannungsseite ab, der MV/LV-Gleichstromwandler schaltet sich aus und das LV-Schaltnetzteil auf der Niederspannungsseite öffnet sich und trennt die Mittelspannungsseite und die Feuerzone voneinander ab.

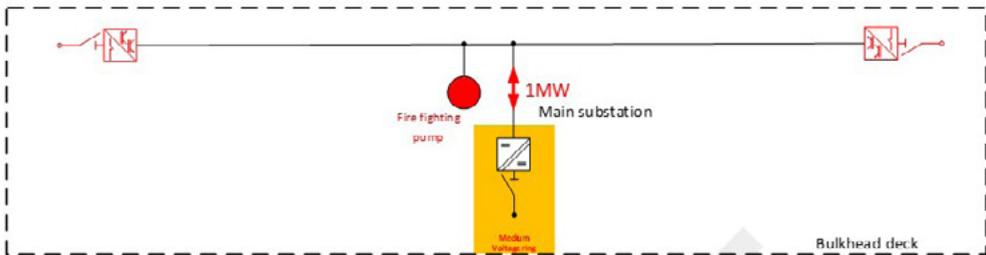


Abb. 3: LV/MV Verbindung

## 2.5. Power Units

Eine Power Unit ist in Bezug auf eine unabhängige Stromversorgung einer Feuerzone der wichtigste Teil. Selbst wenn eine Verbindung zwischen den Feuerzonen über die MV-Verteilung hergestellt wird, muss die Stromversorgungseinheit in der Lage sein, die gesamte Energie zu liefern, welche in der betreffenden Feuerzone benötigt wird. Die MV-Verbindung dient nur als Stromversorgung im Falle eines Ausfalls der Stromversorgungseinheiten, für den Lastabwurf zwischen den Feuerzonen oder die optimierte Aussteuerung der Energieerzeuger.

Alle Verbraucher in den Decks werden sowohl über das gemeinsame vertikale Sammelschienensystem als auch über das gekapselte vertikale Sammelschienensystem versorgt. Beide Sammelschienensysteme werden von den Stromversorgungseinheiten auf dem Unterdeck unter dem Schottendeck versorgt.

Jede Feuerzonen-Stromversorgung besteht aus mehreren Power Units, welche jeweils mit einem Batteriesystem mit einem Batterie Management System und dem zugehörigen Brennstoffzellensystem mit eigenem Controller ausgestattet ist. Beide Systeme speisen gemeinsam die Feuerzone, wobei die Brennstoffzellen die Dauerleistung liefern und die Batterien die transienten Lastschwankungen abfangen. Wenn in einer Feuerzone mehr Energie benötigt wird, als eine Power Unit liefert, werden mehrere dieser Power Units in einer Feuerzone parallel geschaltet. Die Leistungsblöcke schalten sich in Abhängigkeit vom Spannungsabfall ein und aus, d. h. in Abhängigkeit von der verbrauchten Leistung in der

Feuerzone und im gesamten System. Die Anzahl der Aggregate, die in einer Feuerzonen-Stromversorgung installiert sind, hängt vom Leistungsbedarf der Feuerzone ab und kann von Feuerzone zu Feuerzone variieren.

Bei Ausfall einer Komponente in einer Power Unit, z. B. einer Brennstoffzelle oder einer Batterie, wird diese Komponente vom System getrennt. Die verbleibende Komponente dieser Power Unit bleibt weiterhin angeschlossen und unterstützt das System (siehe Abb. 4). Die anderen Power Units laufen weiter und versorgen die Feuerzone. Falls die verbleibende Leistung zu gering ist, um die Feuerzone zu versorgen, wird die fehlende Leistung über die MV/LV-Verbindung von den anderen Feuerzonen geliefert.

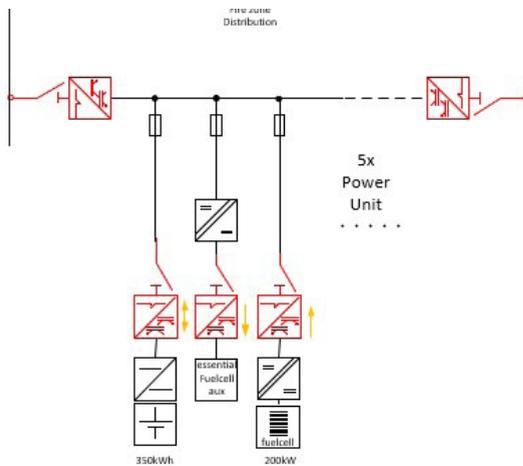


Abb. 4: Power Unit

### 3. Analyse

#### 3.1. Messkampagnen

Um die Beschreibung eines robusten, innovativen Energiesystems im Rahmen des SuSy-Projekts entwickeln zu können, wurden durch die Projektpartner intensive simulative, experimentelle und praktische Untersuchung von Energieverteilungssystemen durchgeführt. Zur Generierung einer fundierten Messdatenbasis für diese Untersuchungen, wurden im Verlauf des SuSy-Projekts Messkampagnen in drei bestehenden elektrischen Schiffenergiesystemen durchgeführt. Untersucht wurden dabei durch die Projektpartner morEnergy, TUHH und DLR die folgenden drei Systeme:

- Messkampagne 1: AC-Sekundärstromnetz auf einem großen Kreuzfahrtschiff

Die Messungen konzentrierten sich auf das Verteilungsnetz mit einer Netzspannung von 400 V und 690 V.

### ■ Messkampagne 2: DC-System mit konstanter Spannung

Dieses Gleichstromsystem ist für den Einsatz in einer Personenfähre vorgesehen und wurde vor dem Einbau ins Schiff als Laboraufbau untersucht. Das System arbeitet mit einer konstanten Spannung an der DC-Sammelschiene.

### ■ Messkampagne 3: DC-System mit veränderlicher Spannung

Dieses Gleichstromsystem, welches mit einer veränderlichen Spannung an der DC-Sammelschiene arbeitet, wurde im realen Betrieb an Bord einer PKW-Fähre messtechnisch untersucht.

Im Rahmen der Messkampagnen wurde Messdaten von Spannungen und Strömen zur Bewertung der Power Quality in den Energiesystemen aufgezeichnet. Weiterhin wurden Impedanzmessungen zur Erfassung der zeit- und frequenzabhängigen Netzimpedanz im Frequenzbereich von DC bis 150 kHz durchgeführt.

## **3.2. Prüfstandversuche**

Im neu entworfenen Gleichstromlabor der TUHH wurden umfassende Versuche zur Untersuchung des Einflusses von unter anderem Spannungsversorgung und Erdschlussverbindungen auf mit DC betriebene Motormodule (MoMo) durchgeführt. Dabei wurden auch die Unterschiede bezüglich Betriebssicherheit und EMV zwischen TN-S- und IT-Systemen untersucht. Der Testaufbau bestand dabei aus zwei Motoren unterschiedlicher Leistungsklassen, die gegeneinander betrieben werden können und somit jeweils als Last für den anderen Motor dienen können. Gespeist werden die Motormodule von zwei in Reihe geschalteten 350 V DC Versorgungen, die somit +/- 350 V DC liefern können. Die Mittelanzapfung zwischen den Versorgungen kann bei Bedarf mit Masse verbunden werden, die Motormodule selbst können entweder separat mit Masse, oder über einen gemeinsamen Schutzleiter mit Masse verbunden werden. Diese Konfiguration ermöglicht sowohl ein TN-S-, als auch ein IT-Erdungskonzept. In Abb. 5 ist das Single Line des Testaufbaus dargestellt, auch sind die Messpunkte (PQx) sowie die Stellen markiert, an denen Erdschluss simuliert wird (GCx). Zudem werden an verschiedenen Stellen Kurzschlüsse simuliert (GSx).

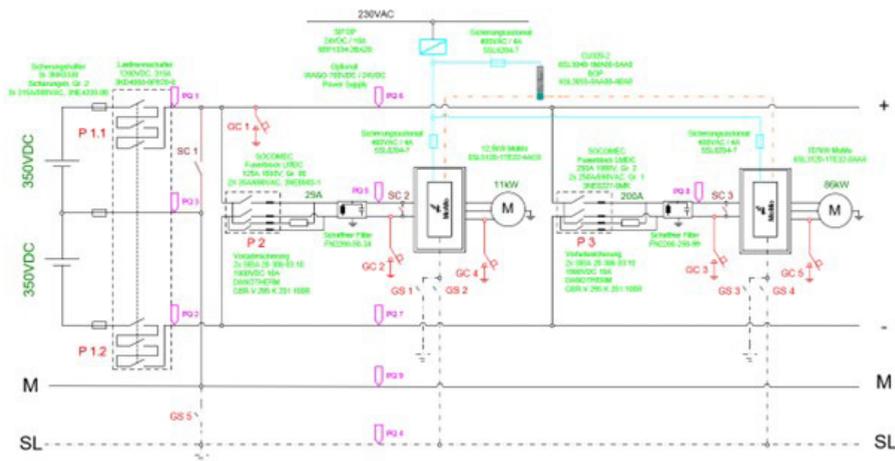


Abb. 5: Single Line des Testaufbaus der MoMo-Versuche

Die Versuche hatten das Ziel, die Effekte zu untersuchen, die bei Gleichstrom auftreten können und durch Simulationen nicht abbildbar sind. Dafür wurden unter anderem Oberwellengehalt und Rippel auf Gleichspannung und Stromflüssen bestimmt. Zusätzlich wird untersucht, welchen Einfluss Filter vor den MoMo haben. Die Messungen wurden daher mit und ohne Filter durchgeführt, wobei die Filter vollständig vom System getrennt wurden, um eine Beeinflussung der Impedanz zu verhindern. Zur Bewertung der einzelnen Einflüsse wurden die Antriebe zunächst einzeln gemessen. Dabei wurde ein Motor auf eine feste Drehzahl eingestellt (oder teilweise auch mit einer Drehzahlrampe betrieben) und der andere Motor hat durch ein vorgegebenes Drehmoment eine Last dargestellt.

## Erkenntnisse

Die MoMo-Versuche haben die Funktionalität des DC-Labors bestätigt. Die Erkenntnisse lassen sich auf folgende Schlüsselerkenntnisse zusammenfassen:

- Die Erdungskonfiguration (TN-S vs. IT) hat keinen Einfluss auf das Systemverhalten.
- Die Messungen in IT-Netzen sind Herausfordernd, da eine vollständige Entkopplung zu der Laborerde sichergestellt werden muss. Diese Potentialverschiebung stellt zudem ein erhöhtes Arbeitssicherheitsrisiko im Labor dar, da sich hohe Potentialunterschiede zwischen der Erde des IT-Systems und dem tatsächlichen Erdpotential im Labor einstellen können. Diese Potentialunterschiede bestehen dann auch zwischen dem Fußboden und Gehäusen von beispielsweise Schaltschränken und DC-Quellen, sodass es bei der Arbeit besonderer Vorsicht bedarf. Dieser Effekt tritt nicht auf Schiffen ein, da kein Potentialunterschied zwischen den Schaltschränken und dem Schiffskörper besteht.

- Bei mehreren Wechselrichtern im gleichen System kann es zu uneindeutiger Selektivität der Schutzeinrichtungen kommen, da die Zwischenkreise bei Kopplung auch als Quelle für die anderen Wechselrichter fungieren können.
- Abgesehen von kurzweiligen Oszillationen mit geringer Amplitude hat der Erdschluss keinen Einfluss auf das Systemverhalten.

### **3.3. Experimentelle Konzeptverifikation**

Die zunehmende Nachfrage nach Gleichstrom-Energiesystemen erreicht auch den maritimen Sektor. Im Bereich von Yachten und Kurzstreckenfähren hat die DC-Technik eine hohe Technologiereife erreicht und ist kommerziell etabliert. Im Bereich größerer Schiffe wie z.B. von Kreuzfahrtschiffen ist dies bislang nicht der Fall. In verschiedenen Forschungsprojekten wurde und wird versucht, umfassende Konzepte für Gleichstrom-Energiesysteme auch für diese Schiffe zu erarbeiten. Speziell das Projekt SuSy zielte dabei auf den Hotelbereich von Kreuzfahrtschiffen. Dabei zeigt sich: ein einfaches Energiemanagement-System kann ausreichen, um ein innovatives DC-Energiesystem mit konventionellen und erneuerbaren Erzeugungseinheiten, Speichern sowie den üblichen Lasten zu betreiben. Zum Nachweis dieser These wurde im Rahmen des Projekts SuSy ein Komplexversuch durchgeführt, für den wichtige Teilergebnisse des Projektes berücksichtigt wurden:

- die designte DC-Energiesystemtopologie für eine Feuerzone
- das Integrationskonzept für die Photovoltaikanlagen z. B. an den Relingen der Balkone
- die berechneten Einstrahlungszeitreihen auf Basis von Kurs- und Satellitendaten
- die synthetisierten Kabinen und Klimatisierungszeitreihen aus dem Projekt EcoCab
- das Simulink Modell Framework für DC-Energiesysteme
- das dezentrale Verfahren zur Droop-basierten Aufteilung elektrischer Lasten auf verschiedene Erzeugungseinheiten
- das einfache Energiemanagement zur Koordination von PV-Einspeisung und Speicherbewirtschaftung

Ziel des Versuchs war nicht nur die Bestätigung der genannten Teilergebnisse, sondern auch der Aufbau von Knowhow im Bereich der Laborkopplung und Co-Simulation. Im Folgenden werden das betrachtete System sowie das Versuchsszenario vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Messungen präsentiert und diskutiert.

### Systemgrenzen

Das betrachtete System ist eine Deck-Feuerzone eines Kreuzfahrtschiffes, in der sich 45 Kabinen befinden. Die Stromversorgung der Kabinen erfolgt über zwei horizontale Stromschienen mit einer Nennspannung von 350 V. Diese horizontalen Stromschienen werden wiederum durch eine steuerbordseitige und eine backbordseitige vertikale Stromschiene versorgt, die jeweils von Mittelspannungssteller (MV/LV-DC/DC-Steller) gespeist werden.

Die vertikalen Stromschienen haben eine Nennspannung von 700 V und werden zusätzlich durch Brennstoffzellen unterstützt. Die Klimatisierung des Decks ist direkt an den 700 V DC-Stromschienen angeschlossen, während die Batterien und PV-Anlagen über die 350 V DC-Stromschienen verbunden sind.

Ein schematisches Diagramm des betrachteten Systems ist in Abb. 6 dargestellt. Um realistische Lastprofile zu simulieren, wurden mit dem Lastzeitreihengenerator aus dem Projekt EcoCab individuelle Lastzeitreihen für jede Kabine erstellt. Diese Zeitreihen basieren auf den tatsächlichen Verbrauchsprofilen der Kabinen. Darüber hinaus wurde die PV-Einstrahlung für die backbord- und steuerbord Seite getrennt in Abhängigkeit von Kurs, Ort und Uhrzeit auf Basis von Copernicus-Satelliten-Daten berechnet.

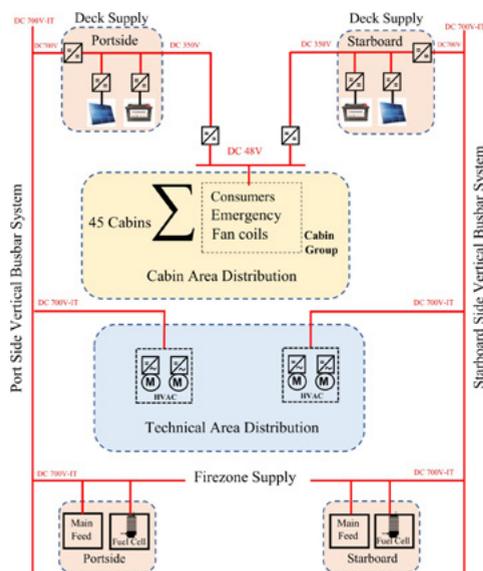


Abb. 6 Vereinfachte Darstellung des betrachteten Energiesystems

## **Versuchsszenario**

Mit dem im Rahmen des Projekts entstandenen DC-Energiesystem Framework wurde das beschriebene Energiesystem in Simulink aufgebaut, wobei die 45 Kabinen aufgeteilt wurden in 42 simulierte und drei emulierte Kabinen. Die Kabinenemulationen wurden jeweils am Laborversuchsaufbau der TUHH durch einen frequenzvariablen Antrieb realisiert, wobei jeder dieser Antriebe aus einem gemeinsamen DC-Bus gespeist wurde. Auf der mechanischen Seite waren alle Antriebe über einen gemeinsamen Riemen mit einem vierten frequenzvariablen Antrieb verbunden, der wiederum die mechanische Leistung aufnahm. Diese vierte Maschine regelte auf eine feste Drehzahl, wodurch die von außen vorgegebenen Lastmomente der Kabinen-Maschinen kompensiert wurden. Das restliche Energiesystem wurde am DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme in Oldenburg simuliert. Eine steuerbare Spannungsquelle an der TUHH diente als „Power Hardware in the Loop (PHIL)“- Schnittstelle und stellte die nötige Leistung zum Betrieb des Laborversuchsaufbau der TUHH bereit.

An den Knotenpunkten des simulierten Teils des Energiesystems haben die konzipierten DC/DC - Wandler steuerbare Droop-Koeffizienten, die vom Energiemanagement des Systems in längeren Intervallen adaptiv angepasst werden. Durch diesen Droop variieren die Spannungen in allen Bussen, also auch in den horizontalen Stromschienen. Die simulierte, lastabhängige Spannung der horizontalen Stromschiene wird von der Spannungsquelle im Aufbau der TUHH auf den dortigen realen DC-Bus gegeben, wodurch sich der PHIL Kreis schließt.

Die Last und Einstrahlungszeitreihen wurden um den Faktor 48 gestaucht, wodurch die Versuchsdauer von 24 Stunden auf 30 Minuten reduziert wurde. Im Folgenden Abschnitt werden nun die Ergebnisse der Simulation dargestellt.

## **Ergebnisse**

Die Last der 45 Kabinen, einschließlich der Klimatisierung im System, schwankt zwischen 4 kW und 14 kW. In Abb. 7 sind die Last-, Leistungs- und Spannungszeitreihen aus dem Versuch dargestellt. In der kumulierten Lastzeitreihe der drei emulierten Kabinen fallen zunächst die kurzen Lastspitzen auf. Sie werden von den Haartrocknern erzeugt. Die sehr schnellen kleinen Laständerungen werden durch das Schalten der Aggregate in den Kühlschränken hervorgerufen, während die Lastplateaus beispielsweise durch die Beleuchtungen und Bildschirme verursacht werden. Der Leistungsbedarf der Klimatisierung wird in diesem Versuch für alle Kabinen jeweils nach zwei Stunden sprunghaft geändert, wodurch das Energiesystem stark angeregt wird.

Im betrachteten Szenario ergibt die an den 14 steuerbordseitigen Balkonkabinen installierte PV-Anlage (8.4 kW<sub>Peak</sub>) eine Leistung von bis zu 3.3 kW. Diese Leis-

tung kann nahezu zu jedem Zeitpunkt durch die lokalen Lasten aufgenommen werden. Lediglich zur Minute 18 (ca. 14 Uhr) wird die Einspeisung aus der vertikalen Stromschiene (aus den Hauptmaschinen) vollständig aus dem lokalen Strommix verdrängt.

Die Latenz vom Absetzen eines Sollwertes für die DC-Busspannung des Versuchsaufbaus an der TUHH bis zur Rückmeldung des entsprechenden Spannungsmesswertes betrug ca. 400 ms. Dieser vergleichsweise hohe Wert führte jedoch zu keinen Stabilitätsproblemen.

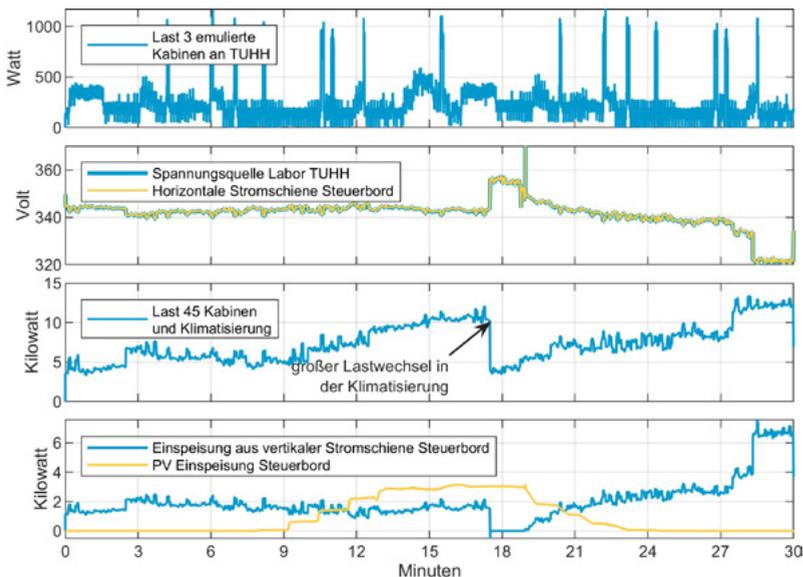


Abb. 7 Ergebnisse der Konzeptverifikation - von oben nach unten: Leistung der drei an der TUHH mit Antriebssystemen emulierten Kabinen; DC-Busspannung der simulierten steuerbordseitigen Stromschiene und gemessene Spannung des gemeinsamen DC-Busses der drei Antriebssysteme in Hamburg; Gesamtlast der 45 Kabinen samt Klimatisierung; Einspeisungen durch vertikale Stromschiene (aus Hauptmaschine) und PV-Einspeisung.

## Diskussion

Durch Kopplung der Simulation am DLR Institut für vernetzte Energiesysteme in Oldenburg mit dem Versuchsaufbau am Institut für Elektrische Energietechnik in Hamburg mussten keine Dienstreisen durchgeführt oder Speditionen beauftragt werden. Auch in Zukunft wollen die Projektpartner reale aber verteilte Netzteilnehmer durch die PHIL-Methode mit einem simulierten Energiesystem koppeln und dieses durch ein reales Energiemanagementsystem steuern.

Die Ergebnisse des durchgeführten Verifikationsversuchs zeigen, dass ein dezentrales Droop-basiertes Regelungskonzept zumindest das betrachtete Energiesystem stabilisiert. Zwischen den Netzteilnehmern ist kein dezidierter Kommunikationskanal nötig. Das SuSy-Konzept sieht nur eine Kommunikation zum Energiemanagementsystem vor, um so beispielsweise den Strommix aus durch Wasserstoff oder LNG erzeugter elektrischer Energie einzustellen. Im vorgestellten Szenario waren jedoch keine Eingriffe des Energiemanagementsystems nötig. Es wurde nur die Versorgung durch die vertikalen Stromschienen betrachtet und die PV-Leistung konnte nahezu durchgehend innerhalb des Systems verbraucht werden. Somit sind Batterien zur Pufferung der PV-Energie nicht erforderlich, insbesondere wenn auch die Decks ohne PV-Potential einbezogen werden.

#### **4. Fazit**

Die zunehmende Nachfrage nach Gleichstrom-Energiesystemen erreicht auch den maritimen Sektor, wo traditionell Wechselstrom-Technik vorherrscht. Das Projekt SuSy hat sich dieser Herausforderung gestellt und ein innovatives Gleichstrom-Energiesystem unter anderem für den Hotelbereich von Kreuzfahrtschiffen entwickelt. Die Netzstruktur des SuSy-Konzepts zeichnet sich durch eine hybride Architektur aus, die sowohl Wechselstrom als auch Gleichstromnetze integriert und zu einer reinen Gleichspannungsstruktur weiterentwickelt werden kann. Diese Flexibilität ermöglicht es, erneuerbare Energiequellen, Brennstoffzellen und Batteriespeicher nahtlos in das System einzubinden. Auf reinen DC-Schiffen kann die Energie in den Feuerzonen durch dezentrale Power Units erzeugt werden, was eine effiziente aber auch resiliente Verteilung der Energie ermöglicht. Um die Robustheit und Innovationsfähigkeit des Systems zu unterstreichen, wurden umfassende Messkampagnen und Simulationen durchgeführt. In einem Komplexversuch wurde das SuSy-Konzept unter Berücksichtigung wichtiger Teilergebnisse verifiziert. Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass ein dezentrales Droop-basiertes Regelungskonzept zumindest das betrachtete Energiesystem stabilisiert. Insgesamt hat das Projekt SuSy gezeigt, dass Gleichstrom-Technik auf Schiffen eine vielversprechende Zukunft hat und zu einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Energieversorgung beitragen kann.

Der nächste Schritt ist es, die Technologiereife der Gleichstromtechnik in diesem Bereich weiter zu steigern. Ein seriennaher Demonstrator mit Kabinen, Kabinenverteilung, PV-Einspeisung sowie Haupteinspeisung muss aufgebaut werden, um die Praxistauglichkeit der Technik in dieser Anwendung zu entwickeln und Kreuzfahrtreedereien zu überzeugen. Nur durch eine solche Demonstration wird sichergestellt, dass die DC-Technik auch auf Kreuzfahrtschiffen ihr volles Potenzial entfalten kann.



# MariData

## Umfassende Technologien für das Energiemanagement von Schiffen - Ein digitaler Zwilling für die Optimierung des Schiffsbetriebs

### Autorenliste

Dr.-Ing. Jochen Marzi	HSVA
Dr.-Ing. Stefan Harries	Friendship Systems GmbH
Dipl.-Ing. Martin Scharf	TUHH
Martin Pontius, MSc.	52°North GmbH
Benjamin Schwarz, M.A.	Universität zu Lübeck
Dipl.-Ing. Jan Kaufmann	DST

---

### 1. Der Einfluss des Betriebs auf Energieverbrauch und Emissionen von Schiffen

Die Emissionen der Schifffahrt stehen zunehmend im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses, und es werden sowohl politische als auch regulatorische Anstrengungen unternommen, um diese Treibhausgasemissionen zu verringern. Während sich die Mehrheit der maritimen Industrie auf neue Generationen von E-Kraftstoffen zu konzentrieren scheint, um künftige Emissionsstandards zu erfüllen, ist die Frage der ausreichenden Verfügbarkeit und des Preises noch ungewiss. Andererseits versprechen Verbesserungen der Konstruktion und der Betriebsleistung erhebliche Verbesserungen der Energieeffizienz einzelner Schiffe und damit des gesamten Seeverkehrs, die den sich abzeichnenden Anforderungen der Emissionsziele für 2030 entsprechen dürften.

Ausgehend von den umfangreichen Erfahrungen mit Konstruktionsverbesserungen haben sich das MariData-Projekt und seine Teammitglieder zum Ziel gesetzt, ein zukunftsorientiertes Energiemanagement- und Entscheidungsunterstützungssystem (DSS) für den Schiffsbetrieb zu entwickeln, das auf rationalen Methoden und Daten basiert, die während der Schiffskonstruktion erstellt wurden. In einem ersten Schritt wird ein digitaler Zwilling des Schiffes und seiner leistungsbezogenen Eigenschaften erstellt, der aus den Konstruktionsdaten abgeleitet werden kann. Hier werden Technologien aus dem EU-Projekt HOLISHIP (Papanikolaou, et al.) angewandt, um umfassende Surrogatmodelle zu generieren, die den gesamten Betriebsbereich abdecken, einschließlich der Verschlechterung der Oberflächenbeschaffenheit des Schiffsrumpfs aufgrund von Bewuchs, der im Laufe der Zeit zu einem erhöhten Widerstand führt. Dieser „digitale Entwurfs-

zwillings“ ist eine Grundvoraussetzung für die Bestimmung des optimalen Energieverbrauchs in allen Betriebsphasen. In einem zweiten Schritt wird ein Modell des Motor-/Maschinensystems an Bord erstellt, das eine weitere Facette des digitalen Zwillings darstellt. In Kombination ermöglichen diese Modelle die Bestimmung des Gesamtenergieverbrauchs an Bord für eine Vielzahl von Betriebsbedingungen während der Lebensdauer eines Schiffes und bilden die Grundlage für einen kontinuierlichen Vergleich der Soll-Leistung des Schiffes mit den Ist-Daten, die durch eine umfassende Datenerfassung an Bord bereitgestellt werden. Die Kombination dieses Energiemodells mit einer fortschrittlichen Routenplanung erfolgt auf der Grundlage einer Kombination verschiedener geografischer Informationen und Satellitenwetterdaten sowie Wettervorhersagen. Während die Sicherheit des Schiffes eine Schlüsselvoraussetzung ist, ermöglichen die Informationen darüber, wie sich das Schiff unter den prognostizierten Umweltdaten verhalten wird, die Optimierung der Reiseplanung unter Verwendung einer Vielzahl verschiedener Zielfunktionen, einschließlich der minimalen Reisezeit und/oder des Kraftstoffverbrauchs oder der Emissionen. Auf der operativen Seite präsentiert MariData der Schiffsbesatzung Planungs- und Ist-Informationen über eine spezielle fortschrittliche Benutzeroberfläche, die einen permanenten Soll-Leistungsvergleich und eine Entscheidungshilfe für Korrekturmaßnahmen ermöglicht. Durch die Verwendung fortschrittlicher Planungsdaten überbrückt MariData die Lücke zwischen modernen Planungssystemen und dem Betrieb. In der einen Richtung wird die Fülle an Informationen, die während des Entwurfs erstellt werden, für einen optimierten Betrieb verwendet, während in der anderen Richtung statistische Informationen, die während des - praktischen - Betriebs gewonnen werden, zukünftige Entwürfe beeinflussen werden.

Im Rahmen des MariData-Projekts wird als Hauptanwendung ein Tanker mit einer Länge über alles von 183 m, einer maximalen Breite von 32 m, einer Tiefe von 16 m, einem Entwurfstiefgang von 9,50 m (Krantiefgang von 10,5 m) und einer Ladekapazität von etwa 45 000 m<sup>3</sup> (Abb. 1) im Hinblick auf seinen Energieverbrauch untersucht. Bei dem Schiff handelt es sich um einen Öl- und Chemikaliertanker, die CB Adriatic (der Kürze halber CBT genannt), der 2019 gebaut wurde, nachdem er gemeinsam für ein voraussichtliches Betriebsprofil, d. h. für mehrere Geschwindigkeiten und Tiefgänge, optimiert worden war. Der Rumpf hat ein asymmetrisches Heck, das Antriebssystem einen Tip-Rake-Propeller und das Ruder einen Costa-Bulb. Die Ergebnisse der Modellversuchen zeigten, daß dieser Schiffsentwurf zu den Besten in seiner Typklasse gehört.



Abb. 1: CB Adriatic (Öl- und Chemikalien-tanker, IMO 9851696), betrieben von Carl Büttner Shipmanagement

Im Rahmen des Projekts wird ein digitaler Zwilling eingerichtet, um die mit Hilfe von Simulationen berechneten und die an Bord gemessenen Verbräuche zu vergleichen und Vorschläge zur weiteren Verbesserung der Energieeffizienz zu machen. Zu diesem Zweck musste die hydrodynamische Leistung des Schiffes für viele verschiedene Betriebsszenarien simuliert werden, z. B. bei ruhigem Wasser, bei Seegang, der für das Betriebsprofil des Schiffes repräsentativ ist, in tiefen und flachen Gewässern, beim Manövrieren und unter dem Einfluss von starken Winden und Strömungen. Wie man sich leicht vorstellen kann, erfordert dies geeignete geometrische Darstellungen des Schiffsrumpfes, des Antriebssystems, der Anhänge und der Aufbauten. Neben dem Tanker wurden auch zwei Schwergutfrachter ausgerüstet und untersucht.

## **2. Simulationsbasierter digitaler Zwilling**

Energieeffizienz ist sowohl für den Schiffbau als auch für die Schifffahrt seit jeher ein zentrales Anliegen. Neben wirtschaftlichen Gründen rückt heute zusätzlich die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften zur Emissionsreduzierung in den Vordergrund. Dies erfordert neben einem optimierten Entwurf auch eine konsequente Strategie der Energieeffizienz im Schiffsbetrieb. Der Energieverbrauch von Handelsschiffen wird weitgehend durch ihre hydrodynamischen Eigenschaften und die an Bord befindlichen Systeme bestimmt. Bis zu 90 % des Primärenergieverbrauchs müssen für den Antrieb aufgewendet und optimal gesteuert werden.

Kern der Entwicklung ist ein digitaler Zwilling des Schiffes auf Basis eines genauen Energiemodells unter Nutzung der bereits im Designprozess des Schiffes vorhan-

denen Informationen. Anstatt allein auf gemessene Betriebsdaten aufzubauen, die häufig durch Sensorfehler beeinträchtigt werden, wird das Modell aus großen Mengen von Simulationen erstellt, die den Energiebedarf aufgrund von Widerstandsanteilen und Propellerwirkung unter verschiedenen Betriebsbedingungen beschreiben. Damit sind im Betrieb bei Abweichungen vom Soll auch kausale Zuordnungen möglich, z. B. zu einem erhöhten Seegangszusatzwiderstand oder der Verschlechterung der Außenhautqualität über die Zeit. Umgekehrt lassen sich mit genaueren Vorhersagen der Umweltbedingungen Reisen mit erhöhter Zuverlässigkeit planen und optimieren.

Das simulationsbasierte Energiemodell des Schiffes nutzt dafür eine Vielzahl von Widerstands- und Propulsionsberechnungen. Diese liegen oftmals bereits aus dem Entwurf vor und müssen „nur“ um weitere Betriebszustände im Lebenszyklus des Schiffes ergänzt werden. Dazu gehören z. B. unterschiedliche Trimmzustände, der Zusatzwiderstand im Seegang oder durch zeitlich zunehmenden Bewuchs der Außenhaut. Im aktuellen Fall des Tankers wurde zudem der aerodynamische Widerstand simulationsbasiert berücksichtigt. Da all diese Berechnungen zeitaufwendig sind und sich nicht für die Nutzung im Rahmen schneller Simulationen eignen, wurden hier Ersatzmodelle, wie sie im Rahmen des HOLISHIP-Projektes von der HSVA und FRIENDSHIP SYSTEMS entwickelt wurden, angewendet. Die HSVA und das DST haben zu diesem Zweck eine Vielzahl von Rechnungen mit unterschiedlichen Verfahren, sowohl viskosen (RANS) als auch potential-theoretischen Methoden – validiert durch zusätzliche Versuche (HSVA, TU Berlin) –, durchgeführt. Aus den Einzelkomponenten ergibt sich mit den Ersatzmodellen ein mehrdimensionaler „Gesamtwiderstandsraum“, der dann dem an der TUHH entwickelten MariPower Modul als Input für die Berechnung der erforderlichen Leistung dient. Dabei wird mittels des von AVL entwickelten Maschinenmodells der Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von Drehzahl und Leistung bestimmt. Abb. 2 gibt einen Überblick über den komplexen Aufbau und die verwendeten Methoden bei der Erstellung des Energiemodells.

Parallel zum Modell werden Messdaten an Bord erfasst. Dazu werden neben Navigationsdaten vor allem Leistung, Verbräuche, Geschwindigkeit gesammelt und über eine gemeinsame Schnittstelle unter Verwendung der Navis Bluetracker Suite integriert und aufbereitet (Hochschule Flensburg). Neben der Nutzung an Bord können die Daten auch an Land analysiert werden. Im Projekt werden auch historische Daten genutzt, um die Algorithmen zu validieren. Die Übertragung von hochfrequenten Daten schafft damit die Grundlage für die Entscheidungsfindung in Echtzeit und die kontinuierliche Verbesserung des digitalen Zwillings. Landseitig wird dieses System durch einen eigenen Server für Geodaten (z. B. Umwelt- und Navigationsdaten) und Routingdienste seitens 52°North ergänzt. Die Architektur gewährleistet einen reibungslosen und effizienten Datenfluss von den Sensoren

an Bord zu den zentralen Systemen und zurück zum Entscheidungsunterstützungssystem an Bord und ermöglicht eine umfassende Überwachung und Analyse. Die von der Universität zu Lübeck entwickelte Visualisierung dieser Daten bietet wertvolle Einblicke in die Schiffsnavigation und -leistung und ermöglicht es den Beteiligten, fundierte Entscheidungen für einen verbesserten Schiffsbetrieb zu treffen.

**DESIGN & ANALYSES**

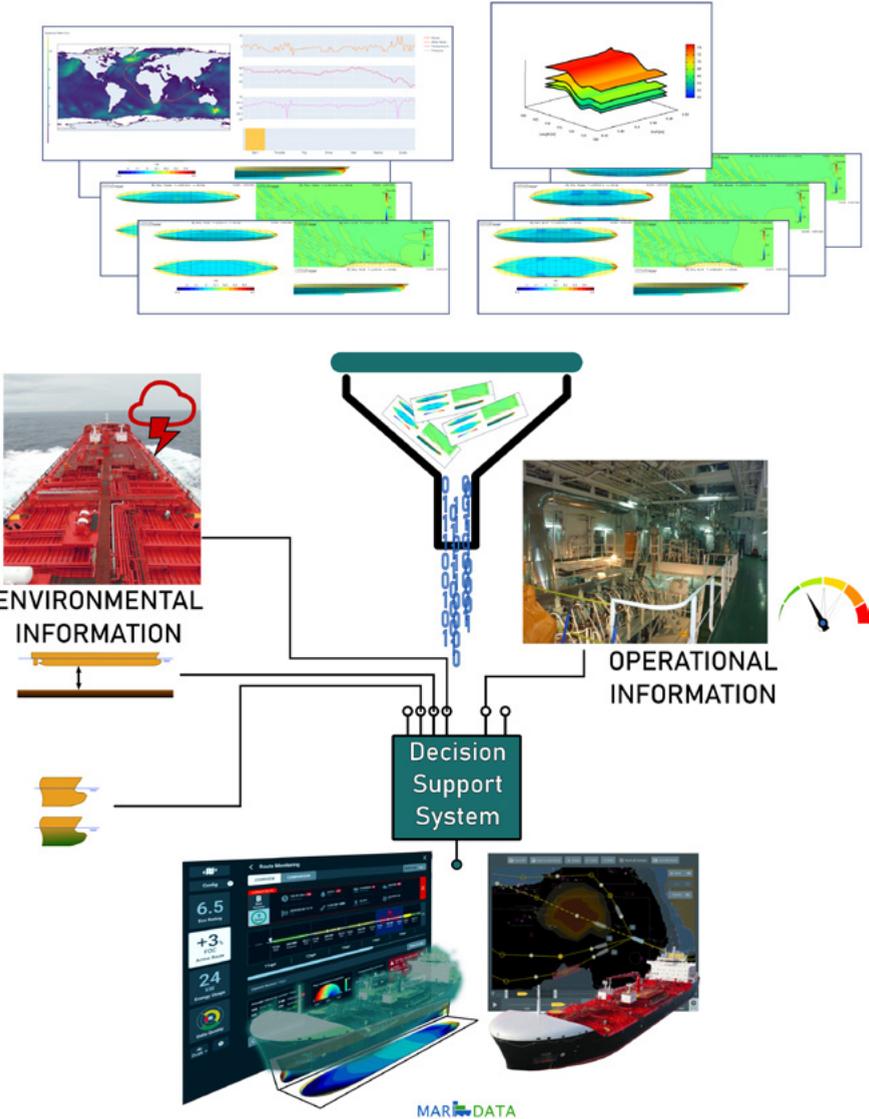


Abb. 2: MariData-Modell (Digitaler Zwilling)

### 3. Geoinformation und Routing

Mittels der Leistungsprognosen aus MariPower wurde ein von 52°North entwickeltes Weather Routing Tool gespeist, das unter Einbeziehung der prognostizierten Umweltbedingungen Routenvorschläge erstellt, welche den Treibstoffverbrauch minimieren. Die Prognosen beinhalten Daten zum Zustand der Ozeane (Wellen, Strömungen, Salinität, Wassertemperatur) und der Atmosphäre (Wind, Lufttemperatur, Luftdruck) und stammen aus dem Copernicus Marine Environment Monitoring Service und dem Global Forecast System. Außerdem werden Bathymetriedaten berücksichtigt, um Flachwassereinflüsse zu modellieren. Die Umweltprognosen stehen abhängig vom Datensatz mit einer räumlichen Auflösung von  $1/12^\circ$  oder  $1/4^\circ$  und einer zeitlichen Auflösung von 1 h oder 3 h zur Verfügung. Es wurden verschiedene Algorithmen evaluiert. Die in Abb. 3 gezeigten Ergebnisse wurden mit einem Isofuel-Algorithmus berechnet. Hierbei erfolgt die Optimierung wie folgt: In jedem Schritt wird geprüft, wie weit das Schiff mit einer festgelegten Kraftstoffmenge bei konstanter Schiffsgeschwindigkeit in verschiedenen Richtungen unter den vorhergesagten Umweltbedingungen fahren würde. Die Segmente werden anschließend nach Kurswinkeln gruppiert, wobei nur die Segmente einer Gruppe behalten werden, welche die Fahrstrecke maximieren. Abb.3 zeigt eine beispielhafte Anwendung in der Biskaya. In orange ist die im August 2023 gefahrene Route des Tankers dargestellt, in blau die optimierte Route. Die Hintergrundkarte zeigt die Windgeschwindigkeiten und -richtungen. Aufgrund niedrigerer Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen weist die optimierte Route einen um ca. 6,4 % geringeren Kraftstoffverbrauch bei nahezu gleicher Reisezeit und nur ca. 1,6 sm längerer Strecke auf.

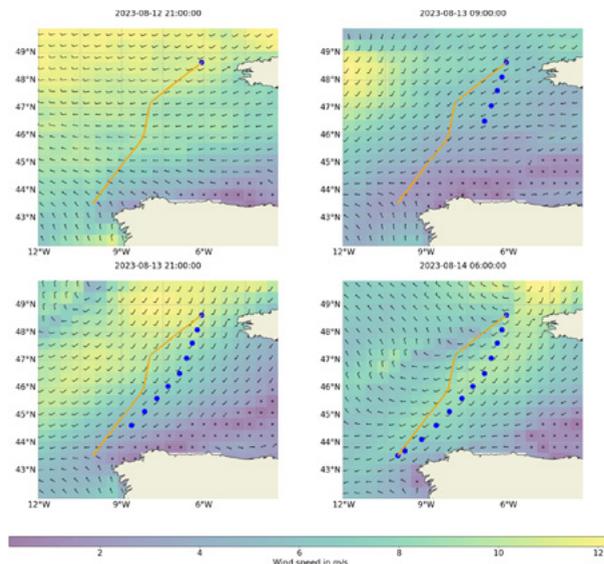


Abb. 3:  
Routenplanung: Gewählte Route  
(orange) vs. optimierte Route (blau)

#### **4. Frontend und DSS**

Das Frontend des Decision Support Systems (DSS) zur Steigerung der Energieeffizienz wurde über den gesamten Projektzeitraum hinweg entwickelt und verbessert (Universität zu Lübeck). Diesem Vorgehen lag der Prozess des User Centered Design zugrunde, angereichert um Elemente, welche eine dem parallel bei allen Partnern stattfindenden F&E-Arbeiten Rechnung tragen sollten. Hierin lag die besondere Herausforderung, daß die Anforderungen nicht im Voraus feststanden, sondern sich kontinuierlich schärften. Um dies zu ermöglichen, wurde u.a. eine stete Feedback Loop sowohl durch die Projektpartner als auch durch erfahrene Seeleute sichergestellt: es wurden 90 Seeleute mit in die Anforderungsanalyse und Gestaltungsphasen involviert; 50 Seeleute waren dabei ausschließlich an der Erhebung und Bewertung von Faktoren zur Energieeffizienz einer Seereise bzw. Routenplanung beteiligt, während weitere 40 sich darüber hinaus direkt und kontinuierlich mit den Gestaltungsvorschlägen zum DSS auseinandergesetzt haben. Elf unabhängige Stakeholder (Reedereien, Charterer, Schiffsausstatter) waren eingeladen, Feedback zum finalen System einzubringen. Weiter war ein Nautiker fester Bestandteil des Teams zur Entwicklung des Designvorschlags und kontinuierlicher Ratgeber in Gestaltungs- und Priorisierungsfragen sowie Ansprechpartner für Sachfragen zu Abläufen und Gepflogenheiten an Bord. Insgesamt ergibt sich hieraus eine Beteiligung von über 100 Experten aus dem Bereich der Seeschifffahrt.

Zentral wurde in diesem Prozess – auch in der vollintegriert stattfindenden u. a. psychologischen Forschung und Studien – die Frage nach der Autonomie der an Bord handelnden Personen. Es wurde gemeinsam festgelegt: Am Ende soll weiter der Mensch an Bord als letztlich Verantwortlicher entscheiden, d. h. Mensch-Maschine-Kooperation anstatt vollständiger Automatisierung und blinder Ausführung. Zur Einordnung der Rolle des Systems in die Routenplanung und Umpfanung sei ein Nutzer zitiert: „Ich brainstorme mit dem System!“ – woraus sich eine schnelle, iterative und kooperative Interaktion auf vorher nicht dagewesene Weise und Vorhersagepräzision ergibt. Das System, Abb.4, ermöglicht also die frühzeitige Simulation und stetige Rückmeldung, wie sich das Schiff in zukünftigen Szenarien verhalten wird. Dies führt zu einer neuartigen und explorativen Herangehensweise bei der energieeffizienten Routenplanung. Es stellt dem Nutzer eine differenzierte Einflussnahme auf Routenoptimierungsvorgänge bereit und macht nebenbei die Logik im Optimierungsprozess auswertbar für zukünftige Entscheidungen. Mittels Perspektive der Human Factors-Forschung konnte herausgearbeitet werden, daß die Berücksichtigung der Basic Psychological Needs der Nutzenden an Bord ein kritischer Faktor bei der Umsetzung aller Energieeffizienz-optimierungsbestrebungen ist, was sich auch im finalen Design niederschlägt. Das MariData-Frontend entstand in einem transdisziplinären Designprozess unter

Beteiligung von Stakeholdern und späteren Nutzenden und ist insofern zeitgleich Research Vessel und Outcome.



Abb. 4:  
User Experience des MariData  
DSS im Simulator der Hoch-  
schule Flensburg

## 5. Ergebnisse/Zusammenfassung

Die systematische Nachberechnung ausgewählter Routen mittels des MariPower Moduls unter Verwendung der bekannten Wetter- und Umweltdaten hat eine gute Übereinstimmung wie in der in Abb.5 dargestellten Mittelmeerreise gezeigt. Es bleiben in einigen Fällen jedoch Unterschiede, die beim Vergleich von simulierter und gemessener Maschinenleistung sichtbar werden. Bei gut validierten Simulationsmodellen bleibt die Frage, ob diese auf die Zuverlässigkeit der Sensordaten aus den Bordmessungen oder ob auf Wetterphänomene die von den, aus dem europäischen Wettergitter interpolierten, Hindcasts zurückzuführen sind. Auch wenn die Simulationen nicht immer absolut genaue Ergebnisse liefern, lassen sie doch klare Tendenzen erkennen. Die Betrachtung des relativen Brennstoffverbrauchs für verschiedene Routen zeigt, daß die wichtigsten Elemente, die den Gesamtenergieverbrauch bestimmen, gut erfasst wurden.

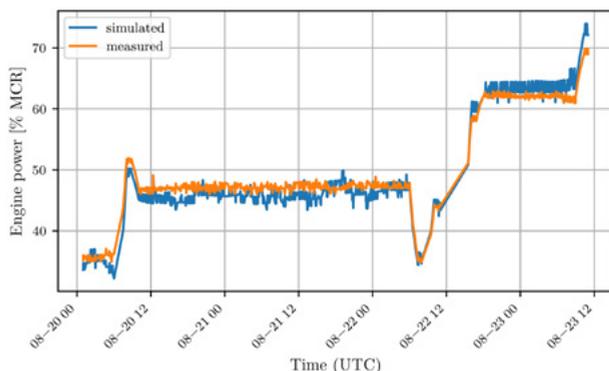


Abb. 5:  
Vergleich der simulierten  
Maschinenleistung mit  
Bordmessungen.

Zusätzlich wurde das MariData System aus Wetterrouting und Energieverbrauch auch auf entwurfsrelevante Fragestellungen angewendet. Durch die direkte Zuordnung von Einflüssen, z. B. dem Seegangszusatzwiderstand oder der Verschlechterung des Außenhautzustandes durch Bewuchs konnten diese Effekte bei einer Reihe von Routen aufgezeigt werden. Es zeigt sich dabei deutlich, daß die Optimierung des Glattwasserwiderstandes in jedem Fall zu einer proportionalen Reduzierung des Treibstoffverbrauchs führt. Die zusätzlichen Seegangs- und Windwiderstände beeinflussen den Verbrauch nicht in gleichem Maße. Sie beeinflussen jedoch die optimale Route, indem sie nachteilige Bedingungen vermeiden und günstige Bedingungen ausnutzen. Daher erscheint es fraglich, ob ein Routing-Algorithmus verlässliche Vorhersagen für Energieeinsparungen liefern kann, wenn die zugrunde liegenden Modelle zu einfach sind, insbesondere wenn die tatsächliche Geometrie des Schiffes nicht ausreichend genau erfasst wird.

Die in MariData gemachten Erfahrungen zeigen, daß ein validiertes Simulationsmodell viele Vorteile gegenüber rein datengetriebenen Modellen bei der Optimierung des Energieverbrauchs von Schiffen im Betrieb hat, da kausale Zusammenhänge besser erkennbar werden. Trotzdem könnte zukünftig ein hybrider Ansatz von Vorteil sein, in dem das hier vorgestellte Synthesemodell die originären Beiträge zum Energieverbrauch ermittelt und Abweichungen aus einem mit Sensordaten gefütterten Datenmodell erfasst werden könnten. Dies ist jedoch Gegenstand weiterer Forschung. Es empfiehlt sich aber bei der Nutzung von Daten aus Bordmessungen eine strenge Überwachung und intelligente Filterung zu verwenden und diese mit genauen Wetter- und Umweltdaten zu verknüpfen.

### **Danksagung**

Das MariData Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert und vom Projektträger Jülich begleitet.

## Literatur

EU Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store. (n.d.). Global Ocean Physics Analysis and Forecast. Retrieved February 8, 2024, from <https://doi.org/10.48670/MOI-00016>

EU Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store. (n.d.). Global Ocean Waves Analysis and Forecast. Retrieved February 8, 2024, from <https://doi.org/10.48670/MOI-00017>

National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. (2015). NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Retrieved February 8, 2024, from <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>

Papanikolaou, A. (2018, 12). A holistic approach to ship design: Optimisation of ship design and operation for life cycle (Vol. 1). Springer International Publishing.

Preuss, K., Schulte, S., Rzazonka, L., Befort, L., Fresemann, C., Stark, R., & Russwinkel, N. (2023). Towards a Human-Centered Digital Twin (Vol. 118). Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827123002809>

Marzi, J., Harries, S., Schwarz, B., Scharf, M., Demmich, K., Pontius, M. (2024), MariData – Digital Twin for Optimal Vessel Operations Impacting Ship Design, Proceedings of 15th Int. Marine Design Conference (IMDC-2024), Amsterdam, The Netherlands, June 26, 2024

# Toxar - Toxic Alarm with AR-Assistance under Water

Entwicklung eines digitalen Echtzeit-Messsystems für gelöste Schadstoffe im Unterwasser-Umgebungsbereich von Tauchern

## Autorenliste

M. Eng. Katharina Lawrenz

Dr. Rudolf Bannasch

Dr.-Ing. Steve Dübel

Prof. Dr. Susanne Heise

MacArtney Germany GmbH

EvoLogics GmbH

Fraunhofer IGD

Hochschule für Angewandte  
Wissenschaften Hamburg

Dr. Christoph Lenth

Dr. Yamen AlSalka

Stefan Scholz

Fabian Merker-Müller

Dr. Hainer Wackerbarth

Dr. rer. nat. Sibylle Pagel-Wieder

Institut für Nanophotonik Göttingen

Institut für Nanophotonik Göttingen

Institut für Nanophotonik Göttingen

Institut für Nanophotonik Göttingen

Institut für Nanophotonik Göttingen  
miprolab GmbH

---

## 1. Einleitung

Unmengen an Munitionsaltlasten/unexploded ordnance (UXO) aus den beiden Weltkriegen, davon 220.000 Tonnen chemische Kampfmittel – so aktuelle Schätzungen – liegen am Grund der deutschen Nord- und Ostsee. Deren vorwiegend aus Metall bestehende Hüllen sind über die Jahrzehnte im Salzwasser immer mehr korrodiert. Dadurch sind sie nicht nur schwer händelbar, sondern gefährliche Substanzen gelangen zunehmend ungehindert in die Wassersäule und den Meeresboden. Dabei stellen konventionelle (hauptsächlich Trinitrotoluol TNT) und chemische Kampfstoffe gleichermaßen eine Gefahr für die Umwelt und den Menschen dar. Bei den chemischen Kampfmitteln sind bezüglich der verklappten Masse Tabun und Senfgas am bedeutendsten. Am häufigsten in Sedimenten detektiert wurden neben Senfgas, Abbauprodukte der arsenhaltigen Kampfstoffe Adamsit, Clark I und Arsinöl. Durch die intensive Nutzung der Meere kommt der Mensch immer häufiger in Kontakt mit diesen Stoffen. Es entstehen z. B. Verätzungen auf der Haut bei Berufsfischern oder bei Touristen durch am Strand angeschwemmte Senfgas-Verklumpungen.

Trotz verstärktem Einsatz von Remotely Operated Vehicles (ROVs) spielen Taucher immer noch eine tragende Rolle bei der Detektion, Vermessung und Beseitigung von militärischen Altlasten. Jeder Kontakt bringt ein Risiko für Gesundheit und Leben mit sich. Gefährliche Substanzen, welche sowohl den Menschen als auch mitgeführte Materialien kontaminieren, stellen nicht nur für Taucher eine Gefahr dar, sondern auch für die Crew an Bord des Operationsschiffs.

In diesem Verbundprojekt wurde ein Arbeitsschutzsystem für Unterwasserarbeiten entwickelt, das während eines Einsatzes in-situ und teils in Echtzeit kontinuierlich Messungen und Analysen schädlicher Substanzen vornimmt und die betreffenden Personen warnt, sollte die Gefahr einer chemischen Belastung bestehen. Dazu wurden drei unterschiedliche Sensoren entwickelt:

- Ein zellbasierter Biosensor für die Detektion von arsenhaltigen Kampfstoffen,
- ein mikrofluidischer TNT-Sensor für Taucher und ROV/AUV für Echtzeitdetektion von TNT im Wasser und
- ein Sensorsystem für die Detektion von Senfgas und Chlorbenzol im Sediment.

Ergänzt durch eine kabelfreie akustische Kommunikation und Positionierung (Firma EvoLogics GmbH), eine augmented reality Visualisierung (Fraunhofer IGD) sowie der Integrationsleistung der MacArtney Germany GmbH ist ein integrierter Sensorgeräteträger als Gesamtsystem entstanden (vgl. Abb. 1).



Abb. 1: Aufbau des Geräteträgers inkl. Teilkomponenten der jeweiligen Kooperationspartner

## 2. In Situ zellbasierter Biosensor für die Gefahrenabwehr unter Wasser

Die Entwicklung eines in-situ zellbasierten Biosensors für die Gefahrenabwehr unter Wasser erfolgte an der HAW Hamburg in enger Kooperation mit der MacArtney Germany GmbH. Der Sensor wurde als ökotoxikologischer Sensor entwickelt, der nicht nur auf einzelne spezifische Arsenkampfstoffe sondern auch auf deren toxische Abbauprodukte im umgebenden Ostseewasser ansprechen sollte mit dem Ziel, die Schiffscrew im Falle der Exposition eines Tauchers während Bergungsaktivitäten zu warnen und es ihnen zu ermöglichen, Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, wenn der Taucher zurück an Bord kommt. Im Kampfstofflabor löste der Sensor bei 0,01 mg/L Clark II und bei 0,11 mg/L BDAO reproduzierbar aus.

Die detektierende Oberfläche des Sensors besteht aus einer Matrix, in der lumineszierende Bakterien immobilisiert sind. Bei Wahrnehmung einer hemmenden Substanz verringert sich die Leuchtkraft, was zu einem Signal führt, das seinerseits in eine Warnstufe umgewandelt wird. Der Sensor wurde zusammen mit der MacArtney Germany GmbH als Kompartiment eines auf dem Meeresgrund positionierbaren Geräteträgers (vgl. Abb. 1) sowie als vom Taucher getragenes Modul entwickelt (vgl. Abb. 2). Weitere Untersuchungen zeigten, dass der Biosensor unempfindlich bzgl. mechanischer Beanspruchung während der Taucherarbeiten, variierenden pH-Werten und Temperaturänderungen ist.

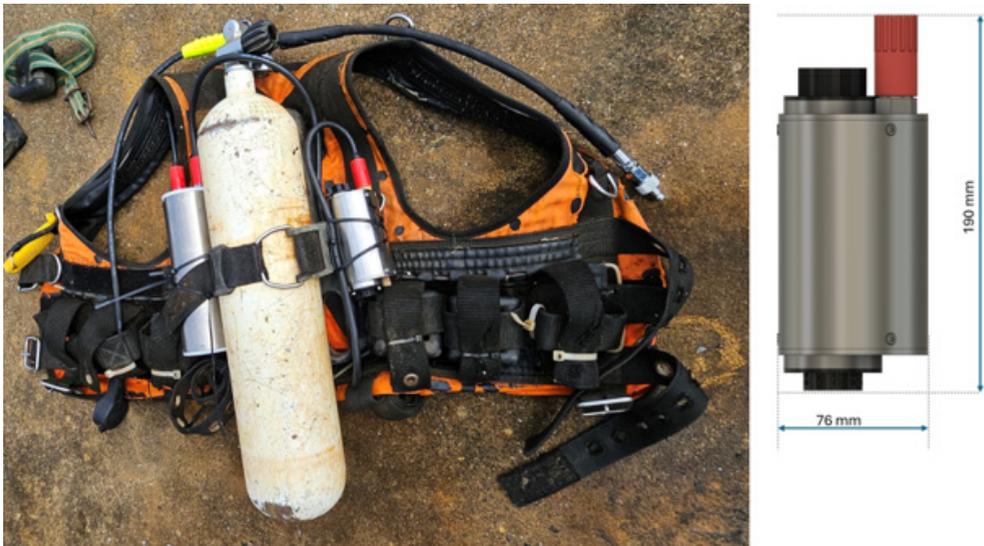


Abb. 2: Taucherkompartiment mit Biosensoren (rechts) und Befestigung am Presslufttauchgerät (PTG) eines Berufstauchers (links).

### 3. TNT-Sensor für Taucher und ROV/AUV

Der Nachweis im Sensor erfolgt über einen mikrofluidischen Chip, in dem die Reaktionspartner, wie Aptamere oder Antikörper, die spezifisch mit TNT reagieren, an der Chipoberfläche gekoppelt sind. Die Signalerfassung erfolgt über die Änderung der Fluoreszenz, d. h., dass mit zunehmender TNT-Konzentration der an der Chipoberfläche immobilisierte Fluoreszenzfarbstoff verdrängt wird und das Fluoreszenzsignal abnimmt. Mit diesem entwickelten fluoreszenzbasierten Sensor wird somit eine Quantifizierbarkeit im Nanogrammbereich realisiert.

Ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt war die Festlegung der Signalerfassung über Fluoreszenz mit dem Fluoreszenzpartikel (ATTO 643N) in Zusammenarbeit zwischen der Firma miprolab GmbH und dem IFNANO. Dieser ATTO 643-Farbstoff zeigt eine starke Absorption, eine sehr hohe Fluoreszenzquantenausbeute und eine hohe thermische und photochemische Stabilität. Das Messprinzip, die spektralen Charakteristika des Farbstoffs und der optischen Komponenten sind in Abb. 3 dargestellt.

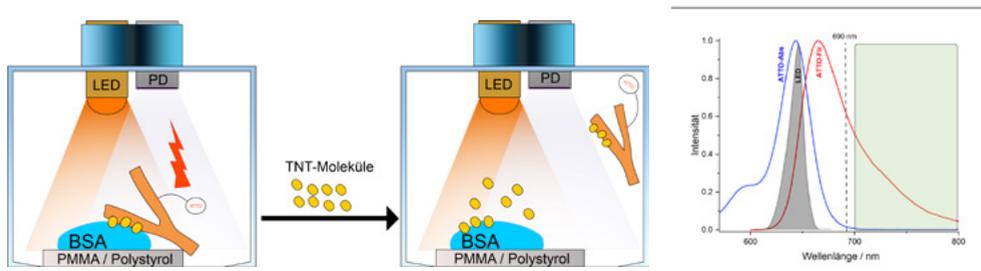


Abb. 3: Schematische Darstellung des fluoreszenzbasierten Messprinzips mit optischen Komponenten (links). Absorptions- und Emissionsspektrum des ATTO 643-Farbstoff, Anregungsspektrum der LED, sowie die spektrale Charakteristika des Langpassfilters.

Zur Anregung der Fluoreszenz wurde eine LED und zur Detektion der Emission eine Photodiode verwendet. Es wurden zwei Photodioden für die Detektion im sichtbaren Lichtbereich mit zwei optischen Filtern verwendet, eine für die Referenzmessung.

Das Gesamtsystem wurde modular aufgebaut, so dass der mikrofluidische Chip als Verbrauchsmaterial leicht ausgetauscht werden kann (vgl. Abb. 5). Für das Ansaugen des Meerwassers durch die mikrofluidisch Kanäle wurde eine peristaltische Miniaturpumpe mit stufenlos regulierbarer Durchflussmenge gewählt (0,03 bis 160 ml/min). Zur Entfernung von Sedimenten aus dem Meerwasser und zur Verringerung von Störungen im Signal wurde eine spezielle Filtereinheit mit mehreren Filterstufen entwickelt. In Abb. 4 ist der Aufbau dargestellt.

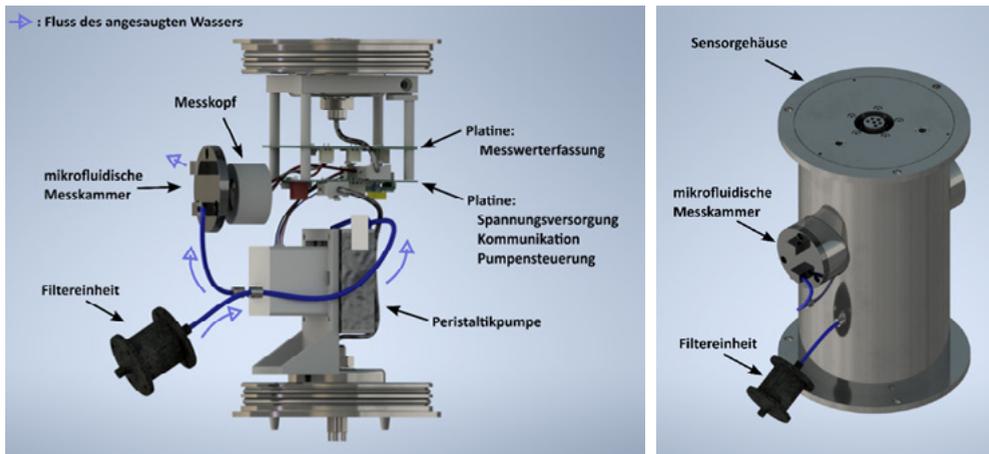


Abb. 4: Konfiguration der einzelnen Komponenten im Inneren des TNT-Sensors (links). TNT-Sensors als Teil des modularen Geräteträgers (rechts).



Abb. 5: Chip-Layout zum Nachweis von TNT

Die Herausforderung in der Entwicklung des TNT-Sensors war die Optimierung des Systems, um im finalen Chip nicht nur eine hohe Spezifität für den TNT-Nachweis und eine Nachweisgrenze im unteren ng/ml-Bereich zu erzielen, sondern auch um die Performance unter Realbedingungen im Meerwasser sicherzustellen. Hierfür wurden die Konzentrationen der Reaktionspartner (Aptamer, Oligonukleotid, Bindungsreagenzien) sowie das Chipmaterial (Polystyrol) entsprechend geprüft, optimiert und auf das System angepasst. Mit dem entwickelten Messkopf konnte eine Konzentration von 8 ng/ml TNT nachgewiesen werden kann.

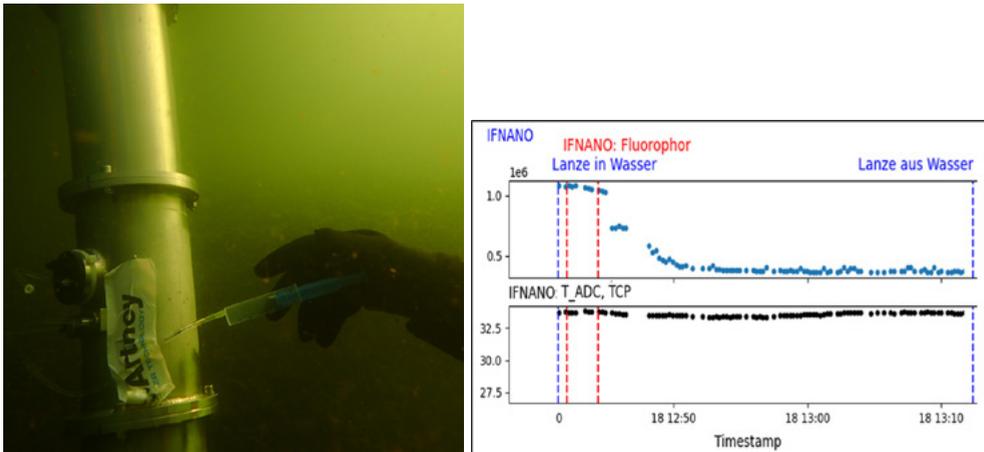


Abb. 6: TNT-Sensor im Realtest im Kieler Hafen. Farbstoff wird in den TNT-Sensor injiziert (links). Mit der Injektion wurde die Messung aufgezeichnet und es ist das Fluoreszenzsignal gegen die Zeit aufgetragen (rechts).

Um den TNT-Sensor zusammen mit dem gesamten System „TOxAR-Geräteträger“ zu testen, wurde über den Partner MacArtney Germany GmbH ein Test im Kieler Hafen organisiert. Da die Verwendung von TNT unter Wasser verboten ist, wurde der Test des TNT-Sensors mit einer Lösung von 5 µg/ml ATTO643, gelöst in PBS, durchgeführt. Wie in Abb. 6 gezeigt, wurde ein Fluoreszenzsignal gemessen, bevor das Signal nach dem Abpumpen der Farbstofflösung aus der Messzelle wieder auf den Hintergrundwert (Meerwasser) zurückging. Der TNT-Sensor wurde also erfolgreich unter Wasser eingesetzt.

#### 4. Analyse von Senfgas unter Berücksichtigung eines sicheren Probenumgangs

Die Entwicklung eines analytischen Verfahrens für die Bestimmung von Senfgas und Chlorbenzol basiert auf einer Penetrationssonde, welche Proben vom Meeresboden nimmt und diese zur Analyse an Land oder auf ein Schiff verbringt. Die Herausforderung bestand zudem in der Entwicklung eines robusten Nachweisverfahrens, das einfach in der Bedienung, zuverlässig und sicher in der Handhabung der Proben ist. Die Extraktion der teils gefährlichen Analyte musste im Wasser erfolgen, so dass keine Sedimentproben mit eventuellen Kampfstoffanhaftungen transportiert oder gar über Wasser verbracht werden müssen.

Die Probenahme ist nach dem in Abb. 7 beschriebenen Schema durchzuführen: (1) Eine Penetrationssonde wird in den Meeresboden gesteckt. (2) An der Spitze der Sonde werden Senfgas und dessen Abbauprodukte an einem beschichteten Beprobungskörper adsorbiert. (3) Sedimentreste werden entfernt und der Beprobungskörper wird in einen gasdichten Behälter überführt. (4,5) Um eine gaschromatographische Analyse vor Ort durchzuführen, wird die Testprobe im

Behälter erhitzt und der Dampfraum wird mittels Festphasen-Mikroextraktion (SPME) beprobt. Als transportablen Gaschromatographen wurde ein Prozess-Gaschromatograph mit Ionenmobilitätsspektrometer als Detektor gewählt, also ein sogenanntes GC-IMS-System. Dieses hat den Vorteil, dass mit dem Detektor substanzspezifische Informationen generiert werden können, wodurch Fehlinterpretationen der Gaschromatogramme vermieden werden. Zudem können Ionenmobilitätsspektrometer auch ohne aufwändige Infrastruktur betrieben werden und sind weiterhin auch nicht stoßempfindlich und somit auf Schiffen einsetzbar.

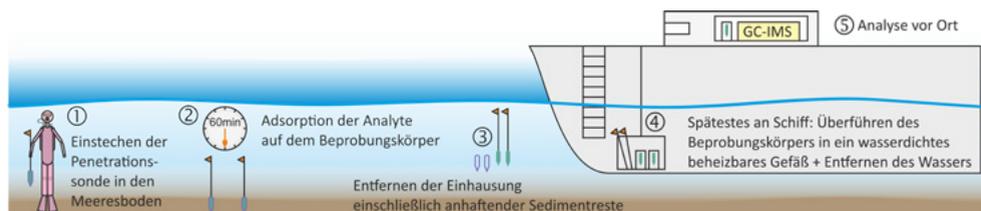


Abb. 7: Beprobungskonzept

Die Methode wurde mittels Sedimentproben getestet, die mit den Analyten Bis(2-chlorethyl)sulfid (= Senfgas) sowie dessen Abbauprodukte 4-Thioxan und 1,4-Dithian sowie der Begleitsubstanz Chlorbenzol versetzt worden sind. Es hat sich herausgestellt, dass das Senfgas im Ionenmobilitätsspektrometer nur mit Luft als Driftgas bei negativer Polarisierung (Messung des Ionenstroms der negativ geladenen Ionen) der Driftröhre mit ausreichend niedrigen Nachweisgrenzen detektiert werden kann. Die Ionisierung muss hierbei chemisch erfolgen (APCI-Methode). Die übrigen Analyten sind für die direkte Ionisation mittels UV-Lampe am empfänglichsten (APPI-Methode). Es muss auch die Driftröhre umgepolt werden, da überwiegend positiv geladene Ionen entstehen. Um den unterschiedlichen Anforderungen bei der Bestimmung der Analyten Rechnung tragen zu können, ist eine Sonderanfertigung eines GC-IMS-Systems beschafft worden, welches beide Möglichkeiten zur Ionisation bereitstellt. Diese Sonderanfertigung des GC-DTIMS 2030 von Schumann - Analytics (Einbeck) ist das erste Gerät seiner Art auf dem Markt. Anhand der Messung von Konzentrationsreihen wurden die Signale der Analyten in den Gaschromatogrammen identifiziert (siehe Abb. 8 und Abb. 9) und es wurden Nachweisgrenzen anhand der Signal-Rauschverhältnisse abgeschätzt. Es wurden für Senfgas (Bis(2-chlorethyl)sulfid) Nachweisgrenzen von  $4 \mu\text{g} / \text{kg}$  in Trockenmasse für sandiges Sediment und  $7 \mu\text{g}/\text{kg}$  für Sediment mit hohem Anteil an organischen Substanzen erzielt. Für das sandige Sediment (Herkunft Kieler Förde) wurden bezogen auf die Masse des getrockneten Sediments  $2,2 \mu\text{g}/\text{kg}$  Chlorbenzol,  $22,0 \mu\text{g}/\text{kg}$  1,4-Thioxan und  $2,0 \mu\text{g}/\text{kg}$  1,4-Dithian nachgewiesen.

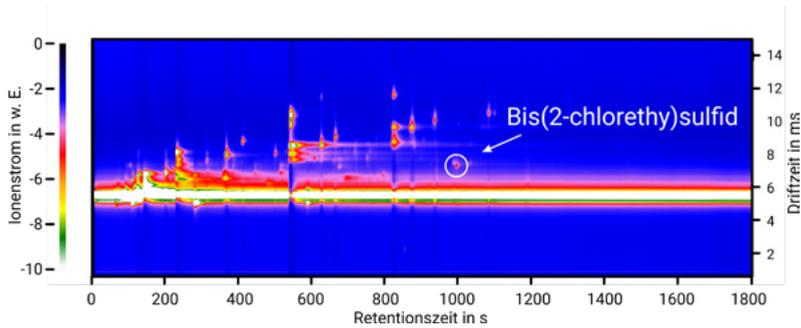


Abb. 8: IMS-Chromatogramm einer ausgesalzten Süßwasser-Sedimentprobe mit Bis(2-chlorethyl)sulfid-Zusatz hoher Anteil an organischen Substanzen)

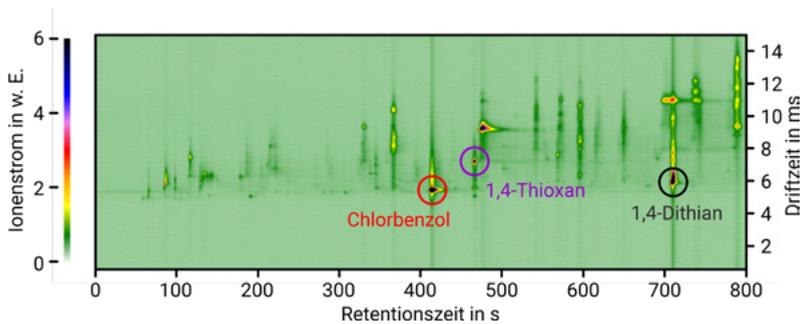


Abb. 9: IMS-Chromatogramm einer sandigen Sedimentprobe versetzt mit Chlorbenzol, 1,4-Thioxan und 1,4-Dithian

## 5. Integration

Aus den Randbedingungen des Unterwassereinsatzes sowie der Wechselwirkung und den unterschiedlichen Anforderungen der Sensoren ist ein robustes, modulares Unterwassergehäuse aus Edelstahl entstanden, was auf Wassertiefen von maximal 30m ausgelegt ist (vgl. Abb. 10). Dabei stellen TNT-Sensor und Biosensor gänzlich unterschiedliche Anforderungen an die Ausgestaltung der Gehäuse. Während der Fokus beim TNT-Sensor auf der Auswahl und Erprobung geeigneter Pump- und Filtermechanismen lag und Wasserein- und auslässe für die Ansaugung und Abgabe des Meerwassers sowie den mikrofluidischen Chip und die anhängige Messtechnik für die nasschemische Analyse berücksichtigt werden mussten, waren anwenderfreundlich austauschbare Bakterienpellets und ein minimierter Lichteinfall bei gleichzeitig optimal durchströmter Messkammer die maßgeblichen Herausforderungen beim Biosensor.

Die Zusammenführung der Sensoren zu einem Gesamtsystem basiert weiterhin auf einem bedarfsorientierten Energieversorgungskonzept sowie einer geeigneten internen Datenübertragung. Während Lithium-Phosphat-Akkus die notwendige

Energie für 3h Messeinsatz bereitstellen, dient ein Mikrocontroller der Datenbündelung sowie internen Ablaufsteuerung und Signalisierung von Betriebszuständen.



Abb. 10: TOxAR Geräteträger als 3D-Modell sowie während des Nasstests in teilmontiertem Zustand

Der BioSensor wurde mit identischem Leistungsspektrum in miniaturisierter Form zur Befestigung unterhalb der Sauerstoffflasche eines Tauchers gefertigt (vgl. Abb. 2). Eine identische Ausgestaltung der Glasaufnahmen ermöglicht es, den Formfaktor der Bakterienpellets und Lichtfallen des Biosensors im Geräteträger beizubehalten.

## 6. Kabelfreie akustische Kommunikation und Positionierung

Im Teilvorhaben TOxAR-Net wurde eine innovative UW-Netzwerklösung entwickelt, die mittels hydroakustischer Ultra-Breitband-Signale (S2C- Technologie von EvoLogics) stets eine schnelle und zuverlässige Datenkommunikation zwischen Sensorlanzen, Tauchern und der Oberflächen-Crew gewährleistet. Dabei fungieren die im Operationsgebiet verteilten und bei der Installation mit GNSS/GPS eingemessenen Sensorlanzen neben ihrer eigentlichen Mess- und Überwachungsfunktion zugleich auch als akustische Beacons, d. h. als stationäre Referenzpunkte/Transponder für die akkurate UW-Positionierung von Tauchern. Die Auswertung der Abstandsinformationen erfolgt mittels einer Spezialsoftware (SiNAPS) im Parallel-Processing direkt in den Tauchermodem durch Triangulation (LBL-Verfahren). Die Integration der S2C-Modems in die Sensorlanzen sowie deren Ankopplung an die Messwertrechner resp. Datenlogger wurde von der MacArtney Germany GmbH realisiert.

Um die Vorgänge unter Wasser permanent auch von der Oberflächen-Leitzentrale überwachen und ggf. auch steuern zu können, wurde dort ein S2C-Modem

mit einer kompakten USBL-Antenne installiert, welches mit einem GNSS-Receiver gekoppelt ist und bei jedem Kontakt, resp. Datenaustausch zugleich auch die genaue GPS-Zeit erfasst und die georeferenzierten Koordinaten der jeweiligen Gegenstation ermittelt. So können alle Bewegungen des Tauchers im UW-Areal mitverfolgt und bei Bedarf auch Navigations- und Zielanweisungen an diese übermittelt werden.

Innovatives Highlight des Teilvorhabens ist ein komplett neuartiges Taucher-Kommunikations- und Navigationssystem, das sich ergonomisch in die Ausrüstung des Tauchers einfügt, diesen bei den Unterwasserarbeiten nicht behindert, sondern bestmöglich unterstützt und auch leicht zu bedienen ist. Der Erfolg vereint drei wesentliche Teilentwicklungen: Teil 1 betrifft die erfolgreiche Miniaturisierung des Tauchermodems mit integrierter (autonomer) Energieversorgung im unterwassertauglichen Verguss mit variabler Montage- und Befestigungsplattform (vgl. Abb. 13). Der zweite große Teilkomplex beinhaltet die erfolgreiche Realisierung einer Anzeige- und Bedienkonsole, die mit einem Fast-Lock Mechanismus am Unterarm des Tauchers befestigt und leicht abgenommen werden kann (vgl. Abb. 13).



Abb. 11: Tauchermodem mit Anzeige- und Bedienkonsole

Der dritte Erfolgsfaktor beinhaltet die projektspezifische Weiterentwicklung der Positionierungssoftware SiNAPS und die Neuentwicklung einer graphischen Anzeige- und Bedienoberfläche für die neue Taucherkonsole. Zudem gibt es eine Schnittstelle zu dem vom Fraunhofer IGD entwickelten Head-up Display im Taucherhelm. Abb. 12 gibt eine Übersicht zu der im TOxAR Verbundprojekt gemeinschaftlich realisierten UW-Netzwerklösung.

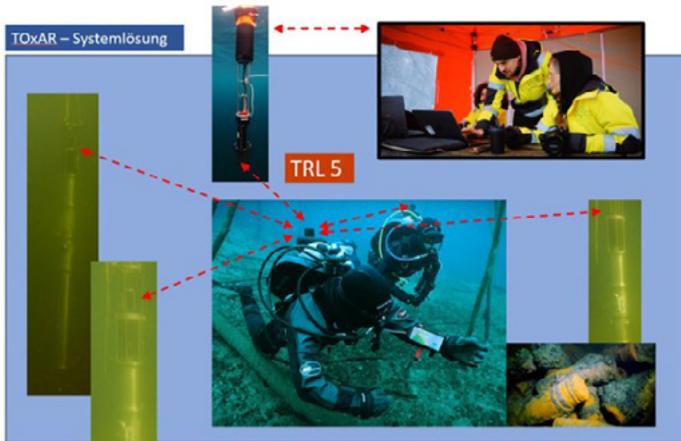


Abb. 12: TOxAR-UW-Netzwerk für optimale Unterstützung und Absicherung von Tauchereinsätzen zur Kampfmittelräumung im Meer

## 7. Echtzeit-Orientierungs- und Alarmierungssystem bei Schadstoffbelastung

Der zu schützende Taucher benötigt eine innovative Informationsanzeige, mit deren Hilfe zu jedem Zeitpunkt und auch bei schlechtesten Sichtverhältnissen Orientierung und Navigation erfolgen kann und die Gefahrenlage schnell erfassbar dargestellt wird. Hierfür wurde ein Augmented-Reality (AR) Taucherhelm entwickelt, welcher den Nutzer unter Wasser mit Visualisierungen und wichtigen Informationen unterstützt.

Für ein solches digitales und unterwasserfähiges Assistenzsystem war es notwendig, eine neuartige Hard- und Software zu erarbeiten, welche in Kombination mit dem für diesen Usecase genutzten Taucherhelm das Unterwasser-AR-Gesamtsystem bildet (vgl. Abb. 13).



Abb. 13: Entwickeltes, prototypisches AR Gesamtsystem mit Taucherhelm  
(Quelle: The Imagination Factory Ltd.)

Eine lagegetreue Augmentierung im Blickfeld des Tauchers stellte unter Wasser nicht nur auf Grund der kabellosen Kommunikation eine besondere Herausforderung dar. GPS kann unter Wasser nicht genutzt werden und auch die Verwendung von optischen Systemen (Kameras) ist unter Wasser aufgrund der Sichtverhältnisse in Nord- und Ostsee nicht zielführend. Deshalb wurde ein von den Projektpartnern EvoLogics GmbH entwickeltes akustische Datenübertragungs- und Positionierungssystem genutzt. Trotz Optimierung sind jedoch bei solchen Systemen Datenübertragungsraten, Latenzen und Präzision nicht vergleichbar mit standardisierten Überwasser-Systemen. Diese Einschränkungen wurden bei der Entwicklung des AR-Displays berücksichtigt.

Eine weitere Herausforderung für die AR-Visualisierung stellten die besonderen Arbeitsbedingungen des Tauchers dar. Die AR-Visualisierung von Orientierungs-, Navigationshilfen wie auch Warnsignale durften den Taucher bei den Arbeiten nicht einschränken bzw. irritieren. Das ohnehin schon verringerte Sichtfeld sollte durch die Darstellung nicht unnötig verkleinert werden. Daher wurde, wie in Abb. 14 zu sehen, eine möglichst einfache Darstellung verwendet. Karten und Missionsdaten können ein bzw. ausgeblendet werden. Auch kann das gesamte AR Display ausgeschaltet werden, um beispielsweise bei kritischen Aufgaben das Sichtfeld vollständig freizugeben. Eine Auslagerung der Anzeige z. B. an ein anderes Anzeigegerät, wie z. B. Tablett, wird ebenfalls durch das Konzept ermöglicht.

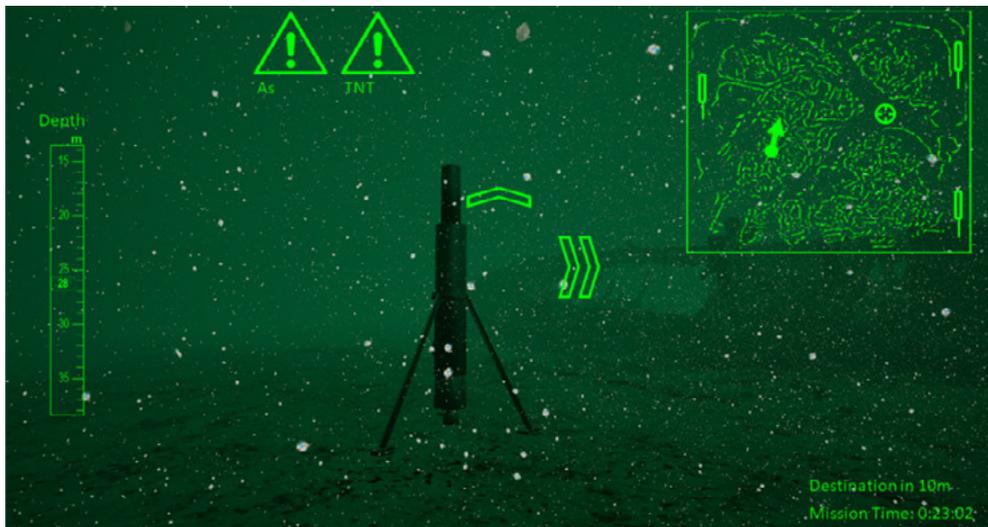


Abb. 14: Illustratives Beispiel der AR-Visualisierung für den Taucher unter Wasser

Das Hardware-Setup umfasst einen Einplatinen-Computer (Raspberry Pi 4) auf dem die Software-Module für Datenaufbereitung, Visualisierung und Interaktion ablaufen, und der durch ein externes Akkupack mit Strom versorgt wird. Eine Inertiale Messeinheit (IMU) und weitere Sensoren unterstützen die Positionsbestimmung beim Tracking und bilden das Sensormodul, das mit dem Computer verbunden wird. Die Bildausgabe erfolgt durch ein angeschlossenes, transparentes Display (JadeBird), welches vor dem Auge des Tauchers unter dem Taucherhelm positioniert wird. Das Display dient zur Darstellung der relevanten Informationen. Die Daten, wie Position, Tiefe, aber auch mögliche Alarme werden von externen Sensoren mittels eines akustischen Modems an den Computer gesendet und dort verarbeitet.

Das Gesamtsystem wurde im Projektverlauf mehrfach getestet und optimiert. Der Unterwasser-AR-Taucherhelm erlaubt die visuelle Unterstützung des Tauchers mit relevanten Informationen und kann so die Arbeitssicherheit, insbesondere bei potenzieller Schadstoffbelastung in Verbindung mit der im Projekt entwickelten Infrastruktur und Sensorik, erhöhen. Der entwickelte Prototyp zeigt die Umsetzbarkeit und Anwendbarkeit des Systems. In der Zukunft sind jedoch weitere Untersuchungen im Bereich der Ergonomie und Datenübertragung sowie Optimierungen im Hardwarebereich, insbesondere für die Miniaturisierungen und zur vollständigen Integration in den Taucherhelm und zur möglichen Weiterentwicklung für herkömmliche Tauchermasken notwendig.

## **8. Ergebnisse, Verwertung und praktischer Einsatz**

Das Projekt „TOxAR“ hat erfolgreich einen innovativen chipbasierten TNT-Sensor entwickelt, der die geforderten Konzentrationen von TNT im Meerwasser detektieren kann. Weiterhin liefert der entwickelte Biosensor nicht nur wertvolle Messwerte einzelner spezifischer Arsenkampfstoffe sondern auch von deren toxischen Abbauprodukten im umgebenden Ostseewasser. Die erfolgreiche Integration der Sensoren in einen Unterwasser-Geräteträger, die kompakte Bauweise und die Bestätigung seiner Funktionalität in Feldtests unterstreichen das Potenzial dieses Systems für Anwendungen bei der Bergung von Munitionsaltlasten, dem Ausbau der Unterwasserinfrastruktur und der Umweltüberwachung. Die entwickelte Sensorik bietet eine kosteneffiziente und zuverlässige Lösung für die Detektion von Explosivstoffen bis zu einer Wassertiefe von 30 m und trägt somit wesentlich zur Sicherheit und zum Schutz der Umwelt bei. Weiterhin gibt es weltweit noch keine vergleichbare Lösung, die eine optimale Einbindung von Tauchern in ein telemetrisches (kabelloses) UW-Netzwerk mit einer beliebigen Anzahl von Sensorstationen und permanenter bidirektionaler Echtzeitverbindung zur Oberfläche gewährleistet. Dies ist für die Arbeit und Sicherheit von Tauchern bei der Kampfmittelräumung insbesondere auch unter schwierigen Bedingungen (Strömung, schlechte Sicht etc.) im Meer von essenzieller Bedeutung. Im Zusammenspiel

mit dem Echtzeit-Orientierungs- und Alarmierungssystem legen die Ergebnisse des Projekts den Grundstein für weitere Entwicklungen und die mögliche Kommerzialisierung des Gesamtsystems. Weiterhin wird ein wesentlicher Beitrag zum Maritimen Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz geleistet, insbesondere mit dem hohen Innovationspotenzial des Systems im Hinblick auf die Digitalisierung und der maritimen Sicherheit.

Ein weiteres Ziel, Senfgas oder seine Abbauprodukte mit praxistauglichen Nachweisgrenzen bestimmen zu können, ist ebenfalls erreicht worden. Es ist zudem gelungen, das Verfahren so zu gestalten, dass keine Gefährdung für die Anwender, also die Taucher aber auch das Personal an Bord des Schiffes, auf dem die Analyse stattfindet, vorliegt. Kein Sediment muss aus dem Meer an die Luft verbracht werden. Damit ist das Verfahren sicher und einfach in der Handhabung für die Anwender.

Da insbesondere das Thema Kampfmittel in Nord- und Ostsee ein Thema von anhaltendem Interesse ist und mit der Hilfe des Sensor Geräteträgers die Gefährdung von Menschenleben vermieden (Null Verluste) sowie die Auswirkungen des Risikofaktors „korrosiver Munitionsaltlasten“ auf die Umwelt berücksichtigt werden kann, kann die Wirtschaft direkt von den Ergebnissen profitieren. Der kürzlich begonnene Bau von Munitionsvernichtungsplattformen unterstreicht diesen Sachverhalt. Unterwasserarbeiten werden maßgeblich erleichtert und unter schwierigen Bedingungen auch deutlich sicherer.

# LeiQaS

## Leise Querstrahler – Reduzierung der Schallemission von Querstrahlanlagen mit Methoden der aktiven Schwingungsreduktion

### Autorenliste

Dr.-Ing. Jörn Hinnenthal	Jastram GmbH & Co. KG
M. Sc. Age Nammensma	Promarin Propeller und Marinetechnik GmbH
M. Sc. Rhena Klose	Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH
Dr.-Ing. Matthias Witte	Universität Rostock Lehrstuhl für Strömungsmaschinen
M. Sc. Mehrdad Kazemi	Universität Rostock Lehrstuhl für Modellierung und Simulation
Dr. rer. nat. Andreas Nuber	Wölfel Engineering GmbH & Co. KG

---

### 1. Verbundprojekt LeiQaS

Im Verbundprojekt LeiQaS sind in einem Zusammenschluss von sechs Partnern aus Industrie und universitären Forschungseinrichtungen Untersuchungen zur Schallemission von Querstrahlanlagen durchgeführt worden. Die dabei verfolgten Ziele sind:

- das Geräuschverhalten der Anlagen zu quantifizieren und zu prognostizieren,
- die Geräuschquellen zu bestimmen und zu lokalisieren,
- Geräusche mit aktiven Maßnahmen der Schallminderung effektiv zu reduzieren,
- den Entwurf geräuscharmer Querstrahler weiterzuentwickeln.

Hierzu wurden sowohl Strömungssimulationen CFD, Modellversuche EFD, wie auch Messungen an einer Großausführung vorgenommen. Nachfolgend sind die beteiligten Projektpartner, sowie Ziele und Schwerpunkte der Teilprojekte kurz umrissen. Drei Themenschwerpunkte werden umfassender dargestellt.

## 2. Projektkonsortium und Schwerpunkte

Im Teilprojekt LeiQiT – Leise Querstrahler – innovative Technologien zur Schallreduzierung (03SX530A) hat die Jastram GmbH und Co. KG mit der Entwicklung und dem Bau der Versuchseinrichtung zur Großausführungsmessung unter Laborbedingungen GAuL zum Gesamtprojekt beigetragen. Hierbei wurde ein Querstrahler im Original mit Sensorik zur Kraft-, Drehmomenten-, Druck-, und Schwingungsmessung ausgestattet, um mittlere und instationäre Messgrößen zu erfassen. Der Versuchsträger wurde im kleinen Rundlaufbecken der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA) aufgebaut.



Abb. 1: LeiQaS Versuchsträger seaQ, Konstruktion und Installation im Tank

Weiterhin wurden Adaptierungen für die Geräte der Forschungspartner zur Hydro-schallmessung und -lokalisierung und zur aktiven Schwingungstilgung vorgesehen. Es wurden Propellervarianten unter variierten Betriebsbedingungen gemessen. Die Methodik zur Schallminderung durch Luftenblasung wurde durch ein adaptives Verfahren verbessert. Neben den experimentellen Arbeiten sind CFD-Untersuchungen durchgeführt worden, (i) um den Anlagenentwurf zu unterstützen, (ii) um das digitale Abbild der Messungen zu bewerten, (iii) und um Optimierungsrechnungen zur Schallminderung vorzunehmen.

Die Ergebnisse der Messungen wie auch der Strömungssimulationen sind bereits während des Projektes in den Entwurf moderner Querstrahlanlagen eingeflossen und werden aktiv zur Kundenberatung eingesetzt.

Im Teilprojekt LeiProp – Schallemissionsarme Querstrahlanlagen (03SX530B) wurden von der Firma Promarin Propeller und Marinetechnik GmbH schallemissionsarme Propeller optimiert und geeignete Entwurfswerkzeuge entwickelt. Ein Schwerpunkt lag auf dem Entwurf eines Propellers mit unregelmäßiger Skewverteilung zur Verminderung der ins Schiff und die Umgebung eingebrachten Schwingungsamplituden. Es wurde eine spezielle Software entwickelt, die es ermöglicht, unregelmäßige Propellergeometrien zu generieren. Durch die gezielte Variation des Skewwinkels von Flügel zu Flügel wird der Abstand zwischen den

Flügelspitzen unregelmäßig, was zu einer entsprechenden Veränderung der propeller-induzierten Druckpulse führt. Auf diese Weise können Resonanzfrequenzen und tonale Anregung gezielt vermieden werden.

Auf Basis von Strömungssimulationen wurden Geometrieoptimierungen durchgeführt, wobei der Schwerpunkt sowohl auf der Reduzierung induzierter Druckpulse als auch auf der Steigerung des Wirkungsgrades lag. Die vielversprechendsten Entwürfe wurden anschließend im experimentellen Aufbau getestet. Sowohl in den Simulationen als auch in den Experimenten zeigten die unregelmäßigen Propeller ihr Potenzial.

Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Auslegung zukunftsweisender Propellergeometrien. In den kommenden Jahren werden Schallemissionen eine zunehmend wichtige Rolle bei der Optimierung von Propulsionssystemen spielen. Der hier entwickelte Ansatz ermöglicht es, die Interaktion zwischen Schiffsstruktur und Propeller in diesen Optimierungsprozess einzubeziehen.



Abb. 2: Fünfflügler mit variiertem Skew, Multipulsion-Konzept

Das Teilprojekt Querstrahler aktiv: QSA - Aktive Schwingungsreduktion für Querstrahler (03SX530F) konzentrierte sich auf eine Schallreduktion der Querstrahlanlage mit einem aktiven Tilger. Dazu wurde auf der Grundlage von strukturdynamischen FEM- und MKS-Simulationen ein Demonstrator für eine Einheit zur aktiven Schwingungsminderung bzw. -isolation entwickelt und in Versuchen in einer Großausführung getestet und vermessen. Im anschließenden Vergleich von Simulationsergebnissen dieser aktiven Einheit und den Messdaten wurde das Simulationsmodell verifiziert und optimiert. Mit dem Projekt konnte erfolgreich die Reduktion von Körper- und Unterwasserschall an Schiffen durch aktive Schwingungsreduktion nachgewiesen werden.

Angesichts steigender Anforderungen bezüglich Arbeitsschutz und Komfort auf Schiffen sind die Erfolgsaussichten für die Weiterentwicklung der Projektergebnisse zu markfähigen Systemen zur aktiven Schwingungsreduktion an Querstrahlanlagen und deren Vermarktung hoch. Darüber hinaus werden die Ergebnisse im Bereich Simulation branchenübergreifend wirtschaftlich verwertet.

Die Teilprojekte:

LeiQopt – Leise Querstrahler – Hydroakustisch optimierte Querstrahlruderpropeller und Schallprognose (03SX530C) der Schiffbau Versuchsanstalt Potsdam GmbH

LoHysQSA - Hydroakustische Untersuchungen an Querstrahlanlagen (03SX530D) der Universität Rostock Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

LeiQaSim – Skalenauflösende numerische Modellierung der instationären hydrodynamischen Effekte in Querstrahlern (03SX530E) der Universität Rostock Lehrstuhl für Modellierung und Simulation

werden mit ihren jeweiligen Schwerpunkten in den nachfolgenden Kapiteln ausführlicher dargestellt.

### **3. Hydroakustisch optimierte Querstrahlruderpropeller und Schallprognose**

Die SVA hat sich in ihrem Teilprojekt auf die Themengebiete Querstrahlruderpropelleroptimierung und experimentelle Schalldruckpegelprognose für Querstrahlruderanlagen fokussiert.

Die hydroakustische Optimierung erfolgte für den Originalpropeller der Großausführungs-Querstrahlruderanlage von Jastram. Ziel der Optimierung war die Reduzierung des Kavitationslärms bei gleichzeitig hoher Wirksamkeit der Querstrahlruderanlage. Dabei verfolgte die SVA die Entwurfsstrategie der Auswahl von zweckmäßigeren Propeller-Profilformen. Die Instabilität der Kavitationsercheinungen an anlagentypischen Profilen führen zu hohen Geräuschemissionen. Die Stabilisierung der Kavitation ist daher die wichtigste Maßnahme zur Geräuschminderung. Aus diesem Grund versprach eine Änderung der klassischen elliptischen Profilform zu neuartigen, punktsymmetrischen Z-Schlag-Profilen ein zielführender Weg zu sein. Die Profilform sollte für eine räumliche Stabilisierung des Abrisspunktes bzw. des Kavitationsbeginns sorgen. Die Entwürfe sind neben dem Originalpropeller P1945 in Abb. 3 zu sehen. Sie wurden als Modellpropeller im Maßstab 1:2.9952 mit einem Durchmesser von  $D = 207$  mm gefertigt und in Modellversuchen untersucht.

Die Validierung der gemessenen hydrodynamischen Kennwerte der Querstrahlruderanlage im Kavitationstunnel erfolgte mit den Messungen an der Großaus-

führungs-Querstrahlruderanlage. Der Vergleich zeigte eine sehr gute Übereinstimmung der Gesamtschub- und Propellerschubbeiwerte in den untersuchten Betriebspunkten.

Eine Herausforderung bei den Akustikmessungen im Kavitationstunnel stellten die auftretenden Schallreflektionen an den Kavitationstunnelwänden dar, die eine Umrechnung der Messergebnisse auf Freifeldumgebung (Quellpegel) bedingten. Zur Ableitung von Transferfunktionen waren daher Kalibriermessungen im Kavitationstunnel und in der Schlepprinne (Quasifreifeld mit den Abmessungen 280 m x 9 m x 4.5 m) nötig.

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt stellte die Übertragung der Modellergebnisse auf die Großausführungsschalldruckpegel dar. Da es aktuell keine offizielle Skalierungsvorschrift für Querstrahlruderanlagen gibt, wurde im ersten Schritt die von der ITTC empfohlene Skalierungsformel für vollkavitierende Einschrauber verwendet, die in ihrer gekürzten Form lautet [1]:

$$L_{pS1/3}(f) = L_{pM1/3}(f) + 20 \cdot \log_{10} \left[ \left( \frac{n_S \cdot D_S}{n_M \cdot D_M} \right)^y \left( \frac{D_S}{D_M} \right)^z \right], \quad \frac{f_S}{f_M} = \frac{n_S}{n_M} \quad (1)$$

mit den Exponenten  $y = 2$ ,  $z = 1$  für niedrige Frequenzen bis zur 5. Flügelzahlarmonischen und  $y = 1.5$ ,  $z = 1$  für höhere Frequenzen. Die Validierung erfolgte mit Großausführungs-Akustikmessungen der GAuL.

Beim Vergleich der skalierten Modellmessungen mit den Großausführungsmessungen war zu erkennen, dass durch das Hydrofon auf der kavitationszugewandten Seite (Saugseite des Propellers) die Pegel der Großausführungsmessung hinreichend genau wiedergegeben werden, während die Pegel des Hydrofons auf der kavitationsabgewandten Seite (Druckseite des Propellers) ca. ab der 5. Harmonischen deutlich unterrepräsentiert waren. Es wird angenommen, dass die Pegel auf der Tunnelauslassseite im hochfrequenten Bereich stark durch im Propellerstrahl auftretende Blasen gedämpft werden und dieser Effekt mit der herkömmlichen Methode nicht einfach skaliert werden kann. Durch eine Anpassung des Exponenten  $z$  für höhere Frequenzen zu  $z = 3$  in der Skalierungsformel der ITTC konnte dies behoben werden.

Der Erfolg der hydroakustischen Optimierung eines Querstrahlruderpropellers auf Basis einer veränderten Profilform mit Z-Schlag konnte bestätigt werden. Ein „weicher“ Z-Schlag mit abgerundeter Kante wie bei dem Propeller P1965 zeigte hierbei Vorteile gegenüber einem „harten“ Z-Schlag-Design mit scharfer Kante wie bei dem Propeller P2012. Das Gesamtschub-Leistungs-Verhältnis der Querstrahlruderanlage konnte mit dem optimierten Querstrahlruderpropeller je nach

Betriebspunkt um 0.05 bis 0.06 kN/kW im Vergleich zum Ausgangspropeller erhöht werden. Gleichzeitig wiesen die optimierten Propeller 3 bis 10 dB niedrigere Maximalschallpegel im kavitationslärmdominierten Frequenzbereich von 1–40 kHz auf.

In Anbetracht des zunehmenden Strebens der Schiffseigner nach Komfort, den zukünftigen Regularien zur Lärmreduktion und den geringen Mehrkosten bei der Verwendung eines alternativen Propellerdesigns ist davon auszugehen, dass Propeller mit Z-Profilen eine hohe Akzeptanz in der Schiffbauindustrie finden werden. Aus diesem Grund wurden Schutzrechte in Form eines Gebrauchsmusters angemeldet [2].

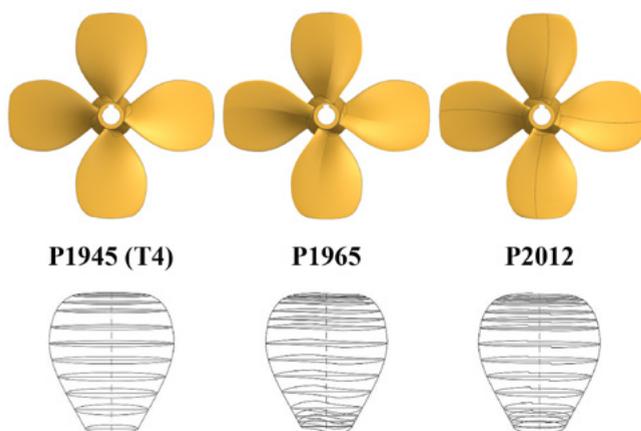


Abb. 3:  
Untersuchte Querstrahlruder-  
propellervarianten und ihre  
Profile

#### 4. Hydroakustische Untersuchungen an Querstrahlanlagen

Für eine gezielte Optimierung bzw. Reduzierung der Hydroschallabstrahlung von Querstrahlanlagen (QSA) ist es erforderlich, Messverfahren bereitzustellen, die Hydroschallquellen räumlich am Propeller oder anderen Anlagenteilen einer QSA lokalisieren können. Zielstellung des Teilprojektes LoHysQSA ist es, die hierfür benötigten experimentellen, hydroakustischen Messverfahren zu entwickeln und im Rahmen von Großausführungsuntersuchungen in der Praxis einzusetzen. Für den Frequenzbereich unterhalb von 5 kHz werden holographische Verfahren auf Basis der Equivalent Source Method (ESM) und unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen bei der Analyse rotierender Schallquellen, wie sie am Propeller einer QSA vorzufinden sind, entwickelt und in experimentellen Untersuchungen eingesetzt. Für den Frequenzbereich oberhalb von 5 kHz werden Beamforming-basierte Verfahren weiterentwickelt und eingesetzt. Kombiniert werden die hydroakustischen Untersuchungen mit Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen zur Untersuchung der Kavitationsblasendynamik.

In der Abb. 4 (links) ist der Grundaufbau für die experimentellen, hydroakustischen Untersuchungen an einer QSA im Rundlaufbecken der HSVA dargestellt. Über den Tunnelumfang werden die im Betrieb der QSA auftretenden Wanddruckschwankungen durch 20 dynamische Drucksensoren, welche saugseitig unmittelbar vor der Propellerebene angeordnet sind, aufgezeichnet. Im Fall von holographischen Untersuchungen wird die hydroakustische Abstrahlung innerhalb des QSA-Tunnels an ca. 1000 räumlich verschiedenen Positionen durch ein einzelnes Kugelhydrofon nacheinander gemessen (Abb. 4 rechts). Da es sich hierbei um ein akustisches Nahfeldverfahren handelt, beträgt der Abstand zwischen Hydrofon und Propeller lediglich 0,35 m. Im Fall von Beamforming basierten Untersuchungen wird statt eines einzelnen Hydrofons eine 3D-Hydroschallintensitätssonde (Abb. 4 mitte) verwendet. Da Beamforming Untersuchungen nicht im akustischen Nahfeld durchgeführt werden müssen, kann die 3D-Hydroschallintensitätssonde kurz vor der Eintrittskante in den QSA-Tunnel, ca. 1 m saugseitig vor dem Propeller, positioniert werden. Der durch die QSA emittierte Hydroschall wird durch die 3D-Sonde ebenfalls an einer Vielzahl von Meßpositionen erfasst. Die Positionierung des Kugelhydrofons und der 3D-Sonde in den Messebenen, senkrecht zur Propellerdrehachse, wird hierbei durch zwei motorisierte Lineareinheiten realisiert. Die Steuerung der Lineareinheiten zum Anfahren der vordefinierten Messpositionen und des Messsystems für die Datenaufzeichnung der Hydrofon-, Wanddruck und Drehzahlsignale erfolgt voll automatisch.

Nach Abschluss der Messungen erfolgt zunächst die Phasenrekonstruktion der sequenziell an den einzelnen Messpunkten aufgezeichneten zeitlichen Verläufe des abgestrahlten Hydroschalls. Die Rekonstruktion erfolgt unter Nutzung eines dynamischen Wanddrucksensors im QSA-Tunnel, welcher als ortsfester Referenzsensor genutzt wird und über den synchron zu den Hydrofonen die Wanddruckfluktuationen aufgezeichnet werden. Über die Phasenrekonstruktion werden die Signale der einzelnen Messpositionen in eine Darstellung überführt, als ob sie nicht sequenziell nacheinander, sondern simultan gemessen wurden, wie es für die holographischen und Beamforming basierten Verfahren notwendig ist. Durch dieses Vorgehen können Messgitter nahezu beliebiger Dichte, unter Nutzung einer geringen Anzahl an Sensoren, synthetisiert werden. Nach Abschluss der Phasenrekonstruktion des gesamten Datensatzes erfolgt die sogenannte De-Rotation. Hierbei wird die Relativbewegung zwischen dem feststehenden Messgitter und dem drehenden Propeller kompensiert, damit eine Lokalisierung der Hydroschallquellen möglich wird.

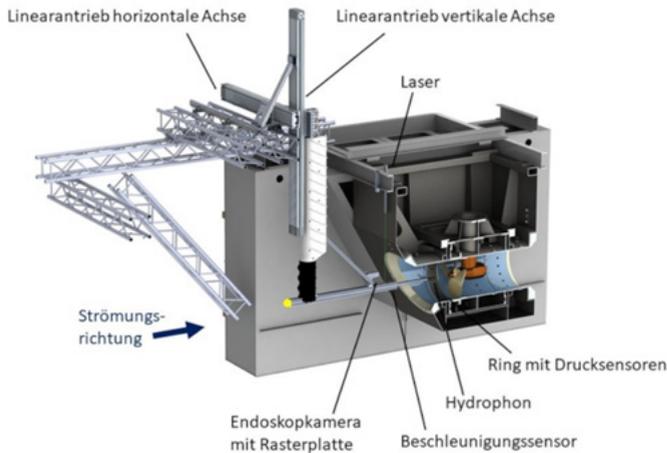
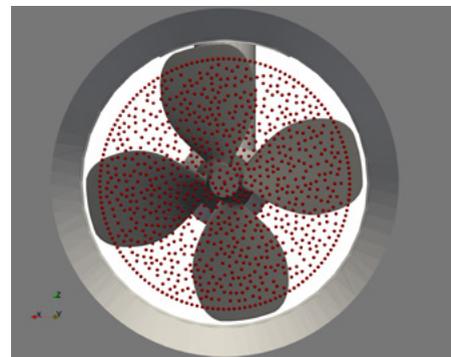


Abb. 4: QSA und experimenteller Aufbau für holographische Analysen mittels der ESM Methode



Links: 3D Hydroschallintensitätssonde mit 7 Hydrofonen für Beamforming Analysen



Rechts: Gitter mit ca. 1000 Messpositionen für holographische Untersuchungen mittels ESM-Verfahren

Grundsätzlich können 3 wesentliche Mechanismen benannt werden, die zur Abstrahlung von Hydroschall durch eine QSA beitragen. Dies ist die Verdrängungswirkung der rotierenden Propellerblätter auf das Fluid, die mit den Propellerblättern rotierenden Druckfelder bzw. auch turbulente Wanddruckschwankungen sowie turbulente Schwankungen des Geschwindigkeits- und Druckfeldes der Nachlaufströmung. Die ersten beiden Mechanismen führen bereits zur hydroakustischen Abstrahlung bei den ganzzahligen Vielfachen der Schaufelpassierfrequenz (Blade Passing Frequency -  $BPF^k$ ). In (2) ist  $n_{Min.}$  die Drehzahl des Propellers pro Minute,  $z$  die Blattanzahl und  $k$  die Ordnung oder harmonische der BPF.

$$BPF^k = \frac{n_{Min.}}{60} \cdot z \cdot k \text{ mit } k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

In Abb. 5 (schwarze Linie) sind die Ordnungen der BPF an den erhöhten Hydroschalldruckpegeln bei den auf die Drehfrequenz des Propellers normierten

Frequenzen bzw. Ordnungen bei  $f/n = 4, 8, 12, 16, \dots$  usw. zu erkennen. Für  $BPF^I$  ( $f/n=1$ ) liegen die Pegel knapp unterhalb von 190 dB und nehmen für höhere BPF harmonische kontinuierlich ab.

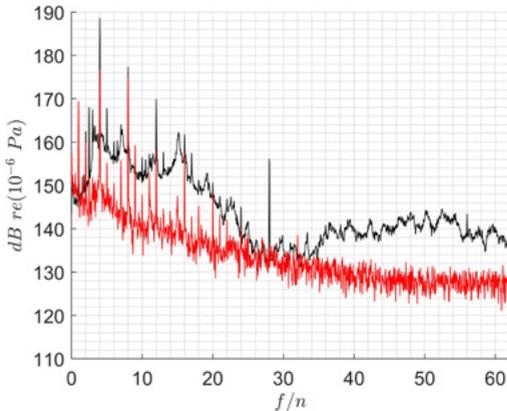
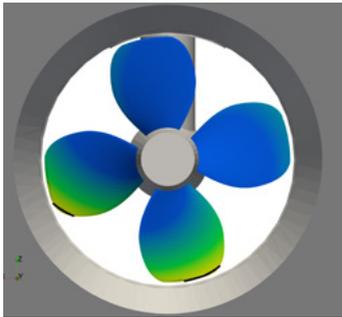


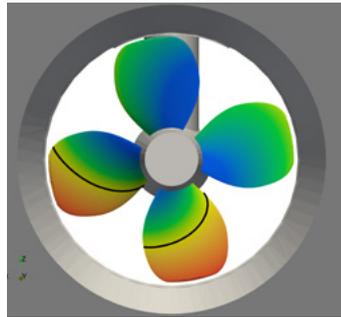
Abb. 5:  
 schwarze Linie: Ordnungsspektrum Hydroschalldruckpegel in dB gemessen durch ein Kugelhydrofon 0,35 m saugseitig vor dem Propeller auf der Drehachse  
 rote Linie: Ordnungsspektrum aus einem aus der Bildanalyse synthetisch generierten „hydroakustischen Signal“

Exemplarisch wird das Ergebnis einer ESM-Analyse für  $BPF^{14}$  ( $f/n = 54$ ) in Abb. 6 vorgestellt. Hierbei wurde die mittels ESM berechnete, komplexwertige akustische Quellstärke  $Q$  aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich zurück transformiert. Die Quellstärke  $Q$  ist farblich kodiert und die Isolinie mit dem Wert  $Q=0$  repräsentiert die Phasenfront. Die zeitliche Entwicklung der Quellstärke  $Q$  kann auf Basis der Phasenfront gut in der Bildsequenz über die 4 dargestellten Phasen verfolgt werden. Ausgehend von der Propellerblattspitze in der 6 Uhr Position läuft die Phasenfront radial in Richtung Propellernabe und greift dabei sukzessive auf die umliegenden Propellerblätter über. Das sehr schnelle voranschreiten der Phasenfront lässt darauf schließen, dass impulsartige Mechanismen zur hydroakustischen Abstrahlung bei dieser Frequenz bzw. BPF-Ordnung beitragen. Kavitation bzw. der impulshafte Kollaps von Kavitationsblasen und den damit verbundenen hydroakustischen Druckstößen (Schockwellen) ist hierfür ein in Frage kommender Mechanismus, der bei dem gewählten Betriebspunkt der QSA in sehr deutlicher Ausprägung auftritt.

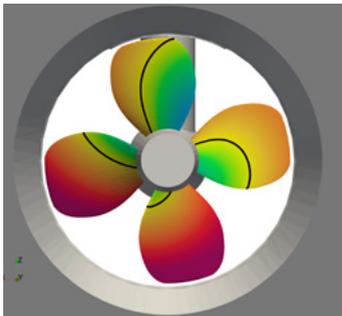
In der Abb. 7 (links) ist das Standbild von Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera dargestellt, in der die Kavitationsbereiche deutlich zu erkennen sind. Im Betrieb des Propellers ist der Bereich zwischen der 5 Uhr und 9 Uhr Position besonders interessant, da hier aufgrund des asymmetrischen Strömungsfeldes mit ausgeprägter Rezirkulation am Tunnelboden das Kavitationsgebiet regelrecht aufgerissen wird und Teile davon kollabieren.



Phase 1



Phase 2



Phase 3



Phase 4

Abb. 6: Ergebnis ESM Analyse für  $f/n = 56$  bzw.  $BPF^H$  (mitrotierendes Bezugssystem)

Farblich: zeitabhängige akustische Quellstärke  $Q$  (blau = negative Quellstärke; rot = positive Quellstärke)

Isolinie:  $Q=0$

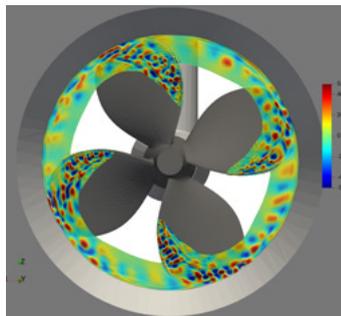
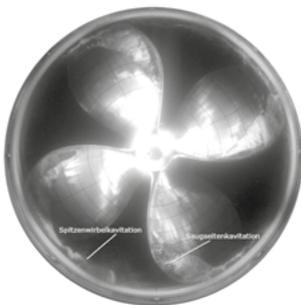


Abb. 7: links: Standbild aus einer mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Bildsequenz von ca. 32000 Bildern zur Analyse der Dynamik der Kavitationsblasen

rechts: Ergebnis einer POD-Modenanalyse der mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichneten Bildsequenzen

Eine detaillierte Analyse der Kavitationsblasendynamik, auf Basis von insgesamt 32000 Einzelbildern, mittels der Proper Orthogonal Decomposition Methode (POD) (Abb. 7 rechts) zeigte ausgeprägte räumlich-periodische Fluktuationenmuster. Dies kann als Indikator verstanden werden, dass es sich hierbei nicht um einen rein stochastischen, chaotischen Prozess handelt, sondern dass auch diesem eine gewisse Ordnungsstruktur innewohnt. Im Rahmen der POD-Analysen wurden die durch die Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichneten Helligkeitsschwankungen im Bereich der Kavitationsblasen als Quellstärke akustischer Monopole interpretiert und dazu genutzt, ein synthetisch generiertes akustisches Signal an der Messposition eines Hydrofons zu berechnen. Das Ergebnis ist in Abb. 5 (rote Linie) ebenfalls als Schmalband-Ordnungsspektrum dargestellt. Angemerkt sei, dass die dB-Skala nur für die gemessenen Hydrofondaten gilt (schwarze Linie) und das Resultat aus der Bildanalyse nur für Vergleichszwecke mit in das Diagramm aufgenommen wurde – beide können aber über eine Transferfunktion ineinander umgerechnet werden. Der Abbildung kann entnommen werden, dass beide Spektren die gleichen spezifischen Charakteristika aufweisen und es damit eine sehr starke Korrelation zwischen den Fluktuationen im Bildbereich und im hydroakustischen Bereich gibt.

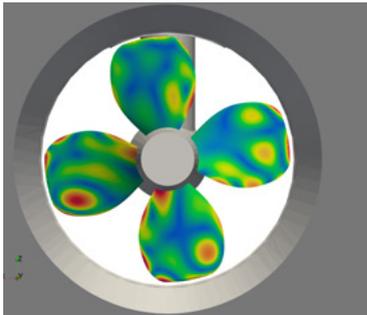


Abb. 8: Ergebnis ESM Analyse für  $f = 3496 \text{ Hz}$   
 Farblich: Absolutwert akustische Quellstärke  $Q$   
 (blau = niedrige Quellstärke; rot = hohe Quellstärke)

Hinsichtlich der ESM-Analyse ist in Abb. 8 für eine Frequenz  $f = 3496 \text{ Hz}$  der Absolutwert der Quellstärkeverteilung  $Q$  dargestellt. Aufgrund der deutlichen Überhöhung der gemessenen Hydroschalldruckamplitude bei dieser Frequenz und dem Verteilungsmuster der dargestellten Quellstärken, scheint es sich hierbei um eine Betriebsschwingform der Propellerblätter zu handeln, die mittels der ESM-Methode identifiziert wurde. Bezüglich der ESM-Methode sei angemerkt, dass jede schwingende Struktur ihrerseits eine hydroakustische Quelle ist und durch die ESM-Methode detektiert werden kann.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Verfahren auf Basis der ESM-Methode zur Lokalisierung rotierender Schallquellen an QSAs entwickelt und bei Messungen an einer QSA in Großausführung eingesetzt und getestet. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die ESM-Methode grundsätzlich für Untersuchungen dieser Art

geeignet ist. Aufgrund der Tatsache, dass im Rahmen der ESM-Methode ein inverses Problem gelöst werden muss, welches zudem immer schlecht konditioniert ist, existiert im Hinblick auf die benötigten Regularisierungsverfahren noch Forschungsbedarf.

### 5. Skalenauflösende numerische Modellierung der instationären hydrodynamischen Effekte in Querstrahlern

Ein wichtiges Ziel des Teilprojektes ist die Aufklärung der physikalischen Mechanismen zur Entstehung der instationären Druckimpulse der QSA und die Entwicklung von Empfehlungen zur Reduzierung der Geräusche und Vibrationen auf Basis moderner skalenauflösender Modelle der turbulenten Strömung. Dazu wurde das entwickelte SLH-Hybridmodell (Shielded LeMoS Hybrid) verwendet, welches eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung stationärer und nicht stationärer hydrodynamischer Effekte in den Bugstrahlrudern demonstrierte. Das Laufrad der QSA wurde geometrisch und zeitlich aufgelöst. Der Fehler der CFD-Vorhersage des Propellerschubs und -drehmoments liegt unter fünf Prozent. Zum Vergleich wurden Berechnungen mit dem DDES (Delayed Detached Eddy Simulation) und URANS (k- $\omega$  SST) Modellen durchgeführt.

Die Analyse von CFD-Daten ermöglicht es, die folgenden Hauptwirbelstrukturen der Strömung zu identifizieren (s. Abb. 9): konventionelle Spitzenwirbel (TV), Gondel (RV) - und Nabenwirbel (HV), Sekundärwirbel an der Tunnelwand (SecV), Strut- und Hufeisenwirbel [3].

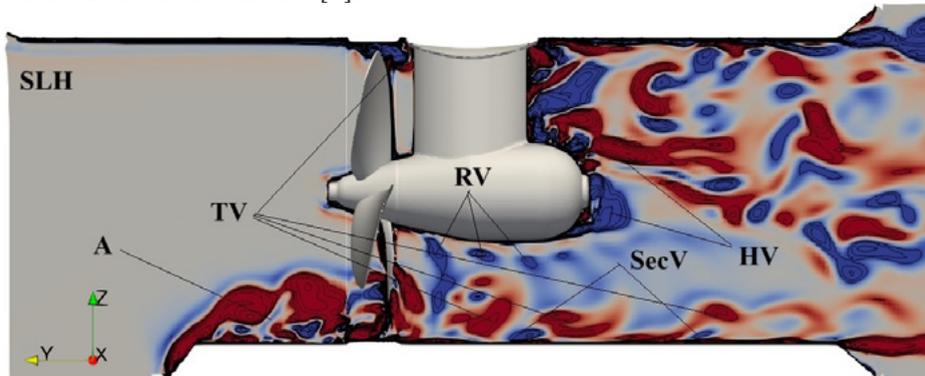


Abb. 9: Momentane Verteilung der transversalen Wirbelkomponente  $\omega_x$

Die CFD-Studie bestätigte eine Erhöhung der Schubschwankungen im Vergleich zu herkömmlichen Propellern, was die Erzeugung von Vibrationen durch eine QSA erklärt. Die mittlere Schubschwankung bezogen auf den mittleren Schub kann hier den Bereich zwischen sechzehn und achtzehn Prozent erreichen, während sie bei herkömmlichen Propellern drei Prozent nicht überschreitet.

Die Analyse der CFD-Ergebnisse ergab einen Unterschied zwischen den Modellen für den Nicht-Kavitationsfall (Abb. 10). Wenn Kavitation berücksichtigt wird, übertrifft sie die Auswirkungen der Turbulenz erheblich. Der Unterschied zwischen den Modellen wird für Kräfte und Drehmoment, zeitlich gemittelte Kraftschwankungen, mittleren Druck und zeitlich gemittelte Druckschwankungen vernachlässigbar.

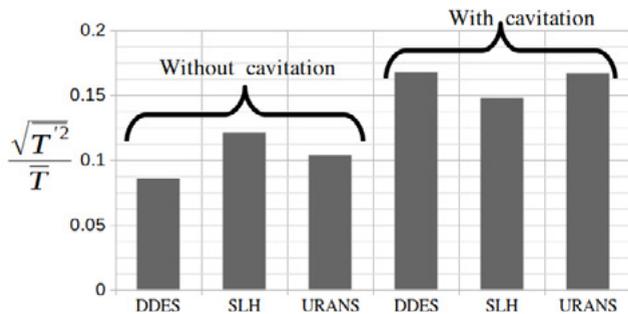


Abb. 10: Schubschwankung (Standardabweichung) bezogen auf den mittleren Schub mit und ohne Kavitation

Die instationären Druckimpulse und die dadurch verursachten Geräusche und Vibrationen der QSA entstehen hauptsächlich durch die Inhomogenität der Strömung im Tunnel, die durch den ungleichförmigen Zustrom aufgrund der Strömungsablösung am Tunneleingang (s. Zone A in Abb. 9), der Auswirkungen der Gondel sowie durch die Kavitation verursacht wird. Die CFD-Studie untersuchte zwei der folgenden technischen Maßnahmen, um die Ungleichmäßigkeit des Zustroms am Tunneleingang zu reduzieren: das Abrunden des unteren Teils am Tunneleingang und die Verwendung von speziell profilierten Schutzgittern. Das Abrunden reduziert die Krümmung der Strömung und verringert damit die Strömungsablösung. Die Leitfläche des Schutzgitters lenkt die Strömung nach unten ab, erhöht die Geschwindigkeit innerhalb der Zone A und verringert somit die Ablösung.

Die Untersuchung dieser Maßnahmen wurde in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurden eine optimale Rundung und ein optimales Schutzgitter mit CFD gefunden. Aufgrund der Komplexität der hybriden Turbulenzmodellierung wurde der Datensatz mit einem parametrisierten CFD-URANS-Ansatz und dem Propellerwirkscheibe-Modell unter Verwendung des Design of Experiments erstellt. Der Datensatz wurde im Anschluss mit der Response Surface Methode analysiert und eine optimale Geometrie ermittelt. Im zweiten Schritt wurde die optimale Geometrie mit dem SLH-Hybridmodell auf die Reduzierung nicht stationärer Lasten und Druckpulsationen getestet. Die Ergebnisse sind in Abb. 11 dargestellt. Die Optimierung des Tunneleingangs und des Schutzgitters führte zu einer signifikanten Verringerung der Schubschwankungen um fast zehn Prozent.

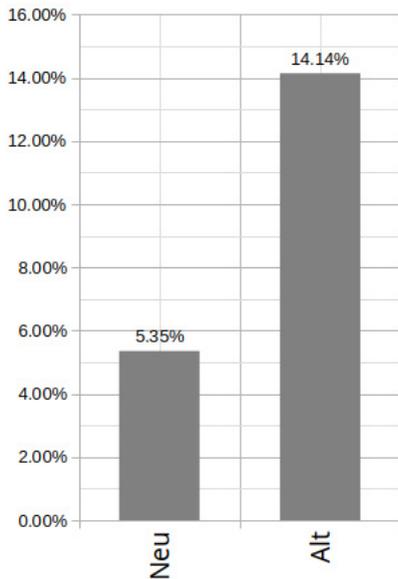


Abb. 11: Schubschwankung (Standardabweichung) bezogen auf den mittleren Schub für die optimierte (links) und herkömmliche (rechts) Geometrie des QSA-Tunnels

Abb. 12 zeigt ein physikalisches Bild der Strömung vor und nach der Optimierung. Das Abrunden der unteren Kontur des Tunnels und die Verwendung eines zweiten Gitterprofils verringern offensichtlich die Höhe der Ablösungszone A. Dies reduziert die Ungleichförmigkeit der Anströmung vor dem QSA-Laufrad und die dadurch verursachten Druck- und Schubschwankungen. Weitere Details dieser Studie findet man in [4].

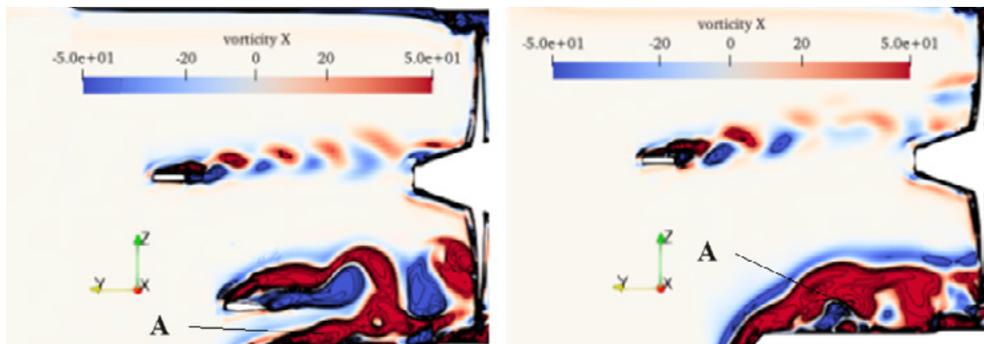


Abb. 12: Momentane Verteilung der transversalen Wirbelkomponente  $\Omega_x$  für die optimierte (links) und herkömmliche (rechts) Geometrie des QSA-Tunnels

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des Verbundprojektes wurde ein umfassendes und vielfältiges Bild über das Betriebsverhalten eines Querstrahlers erarbeitet. Messungen an einer Großausführung unter Laborbedingungen, Maßnahmen der aktiven Schwingungstilgung, Optimierungen und Verfahren zur Propeller- und Anlagenoptimierung, hydroakustische Schalllokalisation und hoch skalenauflösende Strömungssimulationen greifen hier für einen ganzheitlichen Anlagenentwurf und zur Verbesserung von Methoden und Verfahren zusammen.

Die Autoren möchten sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Finanzierung des Projektes und beim Projektträger Jülich für die unkomplizierte und flexible Projektadministration bedanken. Bei allen Projektpartnern möchten wir uns für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

## Literatur

[1] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines (7.5-02-01-05), Modelscale Propeller Cavitation Noise Measurement, International Towing Tank Conference, Copenhagen, 2017.

[2] Schulze, R., Propeller mit Z-Pofilen zur Geräuschminderung und Wirkungsgradsteigerung, Urkunde über die Eintragung des Gebrauchsmusters Nr. 20 2024 000 150, Deutsches Patent- und Markenamt, 2024.

[3] Kazemi, M., Kornev, N., Hinnenthal, J., Scale resolving simulation of unsteady bow thruster hydrodynamics, Ocean Engineering, 2024, 298, 117212, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117212.

[4] Dause M., Kazemi, M., Hinnenthal J., Kornev N., Numerical study of reduction of unsteady effects in bow thruster, eingereicht bei Ocean Engineering, 2024.

# FlaBi

## Entwicklung von Binnenschiffen für extreme Niedrigwasserbedingungen

### Autorenliste

Dipl.-Ing. Jens Ley

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik  
und Transportsysteme e. V.

Nathalie Reinach M. Sc.

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik  
und Transportsysteme e. V.

Benjamin Kossmann M. Sc.

Universität Duisburg-Essen

Dipl.-Ing. Michael Palm

J.M. Voith SE & Co. KG

---

### 1. Einleitung (DST)

Im Jahr 2018 kam es zu langanhaltende Dürreperioden mit extrem niedrigen Pegelständen an Rhein, Mosel, Elbe und den Nebenflüssen. Vor dem Hintergrund des Klimawandels muss zudem mit einem Anstieg der Auftretenswahrscheinlichkeit von extremen Niedrigwasserperioden ausgegangen werden. Aus diesem Grund sind zunehmende Anstrengungen erforderlich, um die Binnenschifffahrt an die geänderten Rahmenbedingungen anzupassen. Hierzu kommen im Grundsatz sowohl wasserbauliche als auch schiffbauliche Maßnahmen in Frage.

Zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein wurde im Juni 2019 unter Federführung des Bundesverkehrsministeriums zusammen mit Vertretern der Stahl-, Chemie- und Mineralölindustrie und des Binnenschifffahrtsgewerbes ein „Aktionsplan Niedrigwasser Rhein“ mit acht Maßnahmen erarbeitet und unterzeichnet. Konkret wird hierin u. a. eine „Anpassung der Transportkonzepte bzw. Optimierung der Transport- und Ladungsgefäße“ gefordert. Das Ziel ist ein „optimierter Umgang mit extremen Niedrigwasserereignissen unter den bestehenden Randbedingungen.“ Neben anderen Ansätzen wird darin „die Entwicklung und angepasste Verfügbarkeit niedrigwassergeeigneter Schiffstypen“ vorgeschlagen.

Als Reaktion auf diese Zielsetzung wurde 2020 das Forschungsprojekt „Entwicklung von Binnenschiffen für extreme Niedrigwasserbedingungen“ (FlaBi) von der Universität Duisburg-Essen (UDE), dem Propellerhersteller J.M. Voith SE & Co. KG (Voith) und dem Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme

e. V. (DST) initiiert. Das Verbundprojekt wurde vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWK) gefördert und endete im Mai 2024.

Das Konsortium setzte sich zum Ziel, verschiedene Propulsionskonzepte zur Steigerung der Manövrierfähigkeit bei Niedrigwasser weiterzuentwickeln, maßgeschneiderte Schiffskonzepte zu erarbeiten und technische Möglichkeiten des Leichtbaus zu untersuchen. Am Ende entstanden innovative Schiffskonzepte, die insbesondere für den Rhein und für die Elbe eine bessere Niedrigwassereignung als die bestehenden Schiffe aufweisen. Die individuellen Entwürfe berücksichtigen die gewässerseitigen Besonderheiten der beiden Flüsse. Zur Erreichung der Ziele wurden zahlreiche numerische Simulationen und Modellversuche durchgeführt.

## 2. Technische Herausforderungen (DST)

Die technischen Herausforderungen in der Binnenschifffahrt im Zusammenhang mit extremem Niedrigwasser sollen an einem konkreten Beispiel skizziert werden: Der niedrigste gemessene Pegelstand in Kaub am Mittelrhein betrug am 22.10.2018 im Tagesverlauf etwa 25 cm. Unter Berücksichtigung des sogenannten gleichwertigen Wasserstands (GLW) führte dieser zu einer Fahrrinntiefe von etwa 142 cm. Berücksichtigt man als Sicherheitsabstand ein minimales Flottwasser von mindestens 30 cm, so ergibt sich für den Maximaltiefgang des Schiffes 112 cm. Vielfach auf dem Rhein eingesetzte Gütermotorschiffe haben die Abmaße 110 × 11,45 m (Länge × Breite) und verfügen über Propellerdurchmesser von 1,7 m oder größer.

Bei einem Tiefgang von z. B. 1,10 m kommt es zum Austausch des Propellers und der Ruder. Das Anfahr-, Stopp- und Manövriervermögen der Schiffe ist unter diesen Bedingungen stark beeinträchtigt. Die zuvor genannten geometrischen Verhältnisse sind in der Abbildung 1 illustriert.

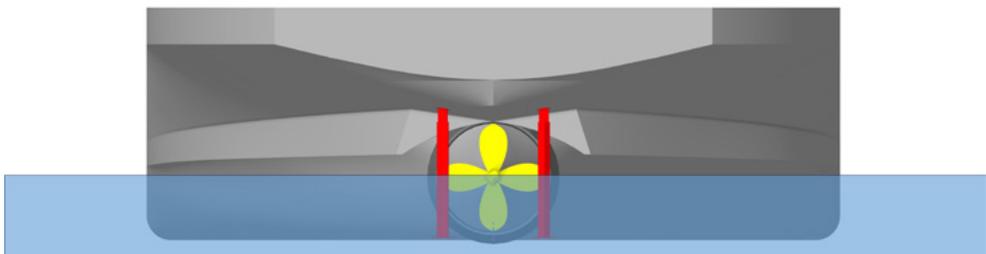


Abb. 1: Größenverhältnisse eines Binnenschiffes mit den Abmaßen 110 × 11,45 m (Länge × Breite) und einem Propellerdurchmesser von 1,7 m bei einem Tiefgang von 1,10 m und einer Wassertiefe von 1,4 m

Folgende weitere technische und betriebliche Herausforderungen sind zu nennen:

- Ein an Niedrigwasser angepasstes Propulsionskonzept, z. B. kleinere Propellerdurchmesser, führen bei normalen Wasserstandsbedingungen zu spürbarem Mehrbedarf bei der Antriebsleistung, da der Wirkungsgrad mit kleiner werdenden Propellern abnimmt. Zur Zeit der Energiewende widerspricht dies den verkehrspolitischen Zielen.
- Aufgrund der geringen Wassertiefe können die Binnenschiffe deutlich weniger Ladung transportieren. Wird eine gewisse Mindestladungsmenge unterschritten, wird der Transport unwirtschaftlich, da die Betriebskosten z. B. für Kapitaldienst, Personal und Treibstoff im Wesentlichen unverändert bleiben. Die Maßstäbe zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sind jedoch situationsabhängig und nicht identisch mit denen der üblichen Marktsituation.
- Die Gewährleistung einer ausreichenden Manövrierfähigkeit ist zu jedem Zeitpunkt erforderlich, z. B. auch beim Auftreten von wind- oder schiffsinduzierten Wellen, d. h. bei Lageänderungen der freien Wasseroberfläche am Hinterschiff.

Vor dem Hintergrund der zuvor genannten Herausforderungen wurden wissenschaftlich-technische Fragestellungen im Bereich der Hydrodynamik und der Strukturfestigkeit abgeleitet, formuliert und im Rahmen des Projekts detailliert untersucht. Ausgewählte Ergebnisse werden im Folgenden mit besonderem Fokus auf die Propulsionsorgane und die erarbeiteten Schiffskonzepte näher dargestellt.

### **3. Propulsionskonzepte und entwickelte Schiffsentwürfe**

Zur Erarbeitung von innovativen Schiffskonzepten wurden zahlreiche hydrodynamische und strukturtechnische Detailuntersuchungen durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse werden im Folgenden mit besonderem Fokus auf alternative Propulsionskonzepte näher dargestellt.

#### **3.1. Schubschiff mit Exenterschaufelrad für den Rhein (DST)**

Ein Untersuchungsschwerpunkt am DST e. V. lag auf der altbewährten Schaufelradantriebstechnik. Der Schaufelradantrieb verfügt über eine besondere Flachwassereignung, da der Wirkungsgrad nahezu unabhängig von der Wassertiefe ist und nur geringe Eintauchtiefen erfordert.

Die letzte vorhandene Entwicklungsstufe des Schaufelradantriebs ist das Exenterschaufelrad mit so genanntem Königsarm. Durch die spezielle Kinematik der Schaufelräder wird die Ausrichtung der Blätter derart gesteuert, dass die Blätter nahezu senkrecht ins Wasser eintauchen und diese Lage über den Großteil des Wegs durch das Wasser beibehalten. Erreicht wird diese Ansteuerung durch

eine exzentrisch zur Schaufelradachse gelagerte Scheibe, die mit einem Steuerhebel einer Schaufel über den Königsarm verbunden ist. Diese Art der Kopplung von Schaufelrad und Exzentrerscheibe verursacht jedoch einen Phasenversatz innerhalb einer Umdrehung. Jede Schaufel wird geringfügig anders angesteuert. Es tauchen nicht alle Schaufeln mit optimaler Stellung ein und verursachen ein oszillierendes An- und Abschwollen des Schubs.

Um die zuvor beschriebenen Zwangsbedingungen zu umgehen und die hydrodynamischen Eigenschaften für alle Schaufeln zu verbessern, wurde im Forschungsprojekt eine innovative Kinematik mit einem getriebegesteuerten Exzenter (anstelle des Königsarms) entwickelt. Diese neue Entwicklungsstufe des Schaufelrads wurde im Modellmaßstab am DST gefertigt und unter Freifahrtbedingungen erfolgreich im Versuchstank getestet. Die Vorauslegung und Dimensionierung der Modellbauteile erfolgten anhand von analytischen Berechnungen sowie mit Hilfe von Simulationsergebnissen auf Basis einer Feldmethode mit der CFD-Toolbox OpenFOAM, siehe Abb. 2 (links).

Die Abb. 2 (rechts) beinhaltet eine Momentaufnahme des gefertigten Schaufelradmodells unter Freifahrtbedingungen im Versuchstank des DST. Schub- und Drehmomentmessungen am Versuchsmodell ermöglichten die Ermittlung des hydrodynamischen Wirkungsgrads.

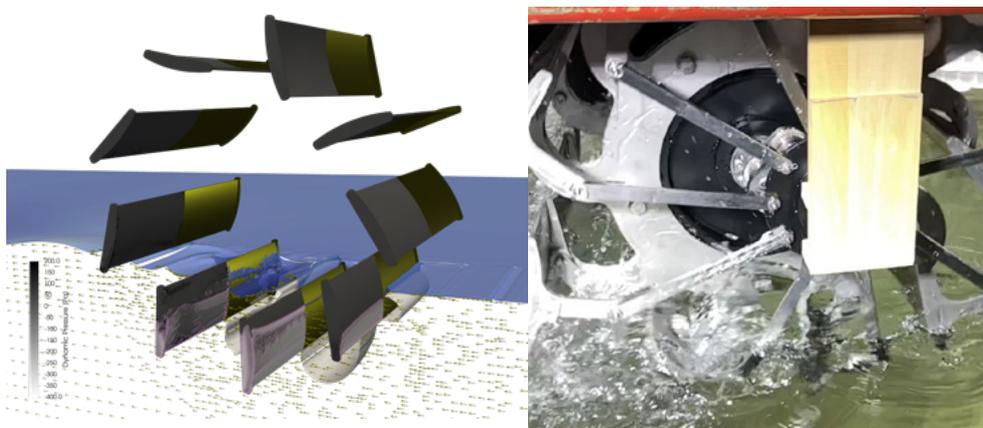


Abb. 2: Berechnungsmodell des Schaufelrads (links), gefertigtes Versuchsmodell im Einsatz (rechts),  
Quelle: DST

Die hydrodynamische Eignung von Schaufelrädern für den Antrieb von Schiffen im Vergleich zu konventionellen Schiffsantrieben veranschaulicht die Abb. 3.. So beinhaltet die Abbildung einen Vergleich der hydrodynamischen Wirkungsgrade für einen konventionellen Propeller, einen Düsenpropeller und für das entwickelte Schaufelrad. Es ist erkennbar, dass das Schaufelrad über den für Binnenschiffe

relevanten Fortschrittsgradbereich zwischen 0 und 0,5 sehr ähnliche Wirkungsgrade wie ein tief getauchter Propeller (ohne Lufteintrag) aufweist. Der Düsenpropeller ist insbesondere bei hoher Belastung (kleine Fortschrittsgrade) zwar weiterhin vorteilhaft. Aber wie zuvor in Abb. 1 gezeigt, kommt es bei den betrachteten Niedrigwasserbedingungen zu einem Austauschen des Propellers und zu einem Wirkungsgradverlust. Während ein Propeller austaucht und der Wirkungsgrad erheblich sinkt, kann das Schaufelrad noch betrieben werden und uneingeschränkt Vorwärtsschub generieren. Die Unabhängigkeit des Wirkungsgrads von der Wassertiefe in den Modellversuchen konnte für das Schaufelrad bestätigt werden.

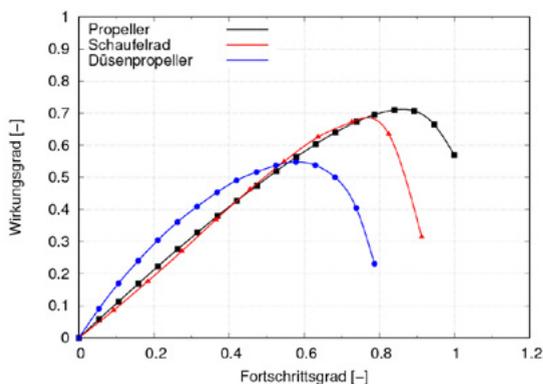


Abb. 3: Vergleich des hydrodynamischen Wirkungsgrads unter Freifahrtbedingungen zwischen einem konventionellen Propeller, einem Düsenpropeller und dem entwickelten Schaufelrad, Quelle: DST

Neben der Berechnung des hydrodynamischen Wirkungsgrads unter Freifahrtbedingungen konnte mit dem entwickelten Simulationsmodell auch Simulationen in der Großausführung durchgeführt werden, um den Maßstabseinfluss abzuschätzen. Die so gewonnenen Erkenntnisse dienen der Auslegung eines realen Schaufelrads bei der Entwicklung eines Schubverbands mit Schaufelradbetriebenem Schubboot, vgl. Abb. 4. Der Schubverband hat die Abmessungen von 110 × 11,45 m (Länge × Breite). Das Schubboot hat eine Länge von 37,5 m und der Leichter eine Länge von 72,5 m. In der kleinsten Formation mit einem Schubleichter hat der Verband eine Tragfähigkeit von etwa 445 t bei T = 1,10 m. Größere Formationen sind möglich.

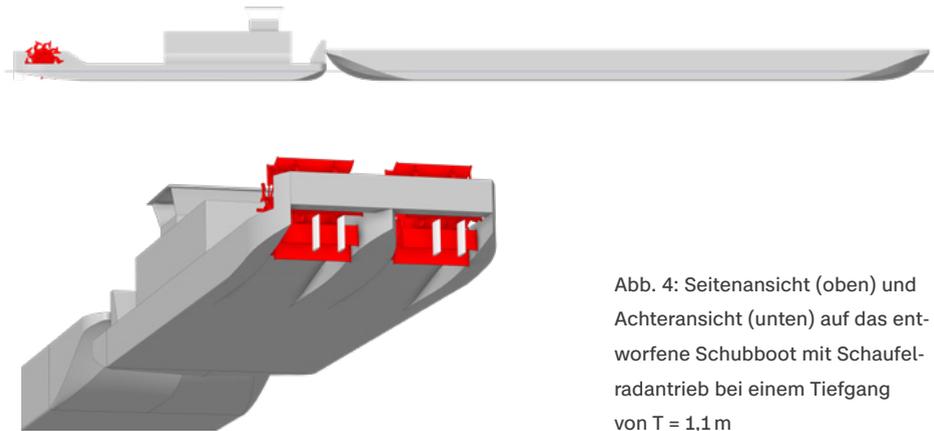


Abb. 4: Seitenansicht (oben) und Achteransicht (unten) auf das entworfene Schubboot mit Schaufelradantrieb bei einem Tiefgang von  $T = 1,1\text{ m}$

### 3.2. Schiffskonzept mit konventionellen Düsenpropellern und dynamischer Tunnelschürze für den Rhein (DST)

Ein alternatives Schiffskonzept setzt zwei konventionellen Düsenpropeller im Zusammenspiel mit dynamischen Tunnelschürzen (Flexunnel) ein.

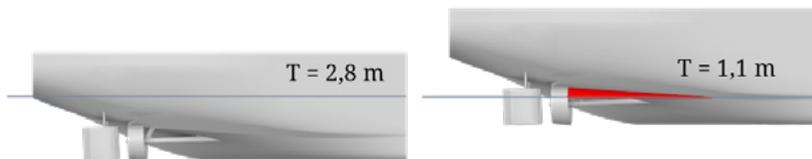


Abb. 5: Einsatzbedingungen und Wirkweise des Flexunnels (rot)

Die Propulsion eines Schiffes mit Propeller und Flexunnel kombiniert traditionelle Propellertechnologie mit speziell angeordnetem, hydraulisch verstellbarem Profil. Der Flexunnel ist ein innovatives System, das bei besonderem Niedrigwasser mit austauchendem Propeller ausgefahren und bei moderaten Wassertiefen und Tiefgängen eingefahren wird. Die Funktionen des Flexunnels sind:

1. Der eingefahrene Flexunnel bewirkt eine signifikante Verbesserung des Propellerzustroms, indem er den Propellerzustrom erhöht und somit die Effizienz des Propellers steigert. Diese Funktion ist besonders in beschränkten Gewässern relevant, wo der Wasserzufluss zum Propeller oft begrenzt ist.
2. Der ausgefahrene Flexunnel verhindert bei niedrigen Tiefgängen die seitliche Luftzufuhr und ermöglicht die Aufrechterhaltung des Propellerschubs.

Bei der Untersuchung dieses Propulsionskonzepts wurde eine umfangreiche Parameterstudie mit Hilfe von Modellversuchen durchgeführt. Dabei wurden

wesentliche Einflussgrößen auf die Propellerwirkung bei ausgefahrenem Flex-tunnel, wie das anfängliche Luftvolumen im Tunnel, die Höhe der Luftsäule, die benetzte Fläche vor der Propellerebene sowie die Höhe und Ausrichtung der Tunnelschürze untersucht.

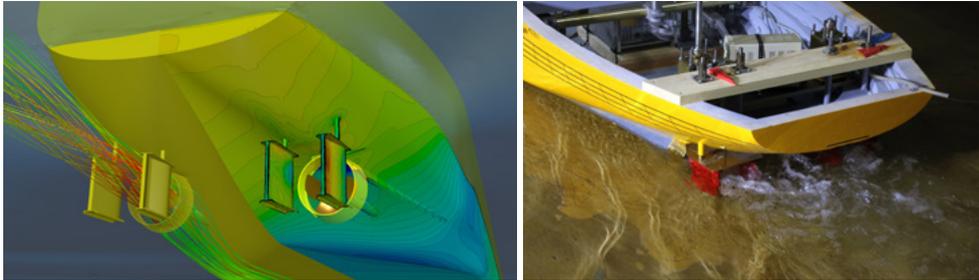


Abb. 6: Beispielhafte numerische Simulation (links) und Modellversuch des Schiffes mit dynamischer Tunnelschürze

Neben den Einflussgrößen der Rumpflinien wurden auch verschiedene Propellerparameter wie z. B. die Steigung, das Flächenverhältnis und die Blattanzahl variiert.

Zur Bestimmung der Grenzbedingungen wurden sowohl numerische Simulationen als auch Modellversuche durchgeführt, siehe Abb. 6. Unter Nutzung der Erkenntnisse wurde ein maßgeschneiderter Linienentwurf erarbeitet, als Modell gefertigt und im Versuchstank des DST untersucht. Die zuvor angenommene Leistungsfähigkeit des Schiffsentwurfs konnte bestätigt werden.

Der Schiffsentwurf hat die Abmessungen  $110 \times 11,45$  m (Länge  $\times$  Breite) und in der kleinsten Formation mit einem Schubleichter eine Tragfähigkeit von etwa 470 t bei  $T = 1,10$  m (ohne zusätzliche Leichtbaumaßnahmen). Alle Manövrieranforderungen, die der Europäische Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe (ESTRIN) fordert, konnten eingehalten werden.

Detailreiche Festigkeitsuntersuchungen von alternativen Leichtbaukonstruktionen (höherfester Stahl in der oberen Gurtung, Einsatz von Stahl-Aluminium Sandwich Profilen in der Laderumlängswand) haben ein Gewichtseinsparpotenzial im Laderaubereich von 44 t ergeben. Hierzu wurden globale und lokale Strukturanalysen sowie Beulfestigkeitsuntersuchungen mit einem Finite-Elemente Modell durchgeführt.

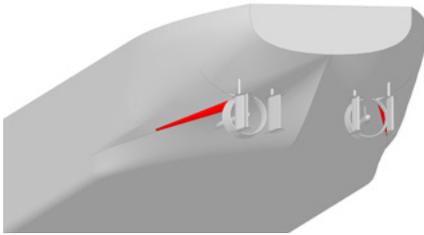


Abb. 7: Rheinschiff mit konventionellen Düsenpropellern und dynamischen Tunnelschürzen, ausgelegt für einen Mindesttiefgang von  $T = 1,1\text{ m}$  und hydrodynamisch optimiert für einen Tiefgang von  $T = 2,8\text{ m}$

### 3.3. Schiffskonzept mit Zykloidalpropeller für den Rhein (VOITH)

Ein weiteres im Verbundprojekt von der Fa. Voith entwickeltes Schiffskonzept für den Rhein nutzt als Propulsionsorgan einen Zykloidalpropeller (Voith-Schneider-Propeller), siehe Abb. 9. Der Zykloidalpropeller ist vertikal ausgerichtet, besitzt 5 Blätter mit NACA-ähnlichen Profilformen und erzeugt durch Änderungen der Blattstellung über den Umlauf den gewünschten Schub mit rechteckiger Strahlfläche. Durch Drehzahl, Amplitude und Phasenlagen der Blattstellungen können die Richtung und Größe des Schubs variiert werden.

Bei einem kleinen Schiffstiefgang erweist sich die Eigenschaft einer rechteckigen Strahlfläche als nützlich. Die Blattlängen können reduziert und nach Bedarf und Raumangebot durch einen größeren Orbitaldurchmesser kompensiert werden. Auch beim Austauschen der oberen Blattsegmente kann der Propeller Schub generieren.

Der Schiffsentwurf hat die Abmessungen  $110 \times 11,45\text{ m}$  (Länge  $\times$  Breite) eine Tragfähigkeit von etwa  $470\text{ t}$  bei  $T = 1,10\text{ m}$ . Die Integration des maßgeschneiderten Zykloidalpropellers und Optimierung des Propulsionsgütegrads durch Anpassung der Heckform wurde von Voith mit Hilfe von zahlreichen numerischen Simulationen durchgeführt, siehe Abb. 8.

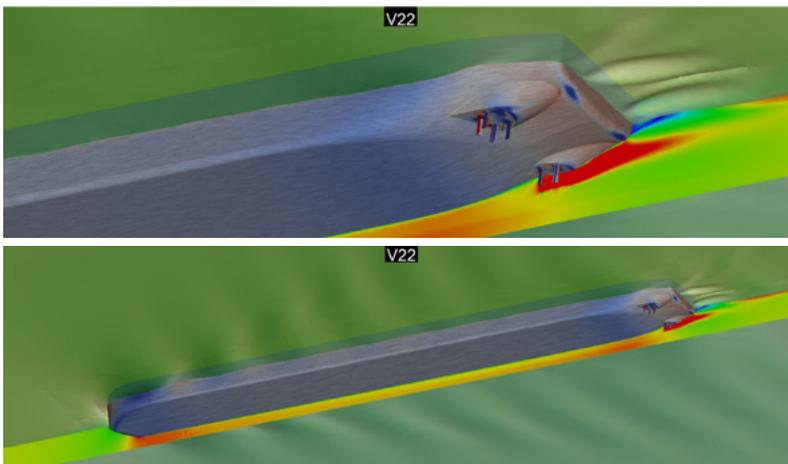


Abb. 8: Numerische Simulationen eines Rheinschiffes mit Zykloidalpropellern

Modellversuche am DST zeigten ein sehr gutes Anfahr- und Stoppvermögen. Die Anforderungen aus der ESTRIN konnten signifikant übererfüllt werden.



Abb. 9: Maßgeschneiderter Hinterschiffsentwurf für den Rhein mit zwei Zykloidalpropellern, ausgelegt für einen Mindesttiefgang von  $T = 1,1 \text{ m}$ , Quelle: Voith/DST

### 3.4. Schubschiff mit Primär- und Sekundärtrieb für die Elbe (UDE/VOITH)

Die Elbe stellt für die gewerbliche Binnenschifffahrt ein anspruchsvolles Fahrgebiet dar. Die Problematik des Niedrigwassers ist jedoch nicht neu. In der Konsequenz kam es bereits mehrfach zum Erliegen des Schiffsverkehrs. Diese Situation stellt für die entlang der Elbe ansässigen Industrien eine extreme Herausforderung dar, was zu einer Verlagerung der Verkehre hin zur Schiene und Straße geführt hat. Die Binnenschifffahrt weist aufgrund ihrer hohen Effizienz eine besondere Eignung für bestimmte Transportaufgaben auf. Dies umfasst sowohl den Containertransport als auch den Transport besonders sperriger Projektladungen, wie beispielsweise Turbinen oder Windenergieanlagen.

Der für die Elbe entwickelte Schiffsentwurf basiert auf einem Schubverband-Konzept. Das Schubschiff zeichnet sich durch einen konstanten Tiefgang aus, wodurch die gesamte Antriebsanlage auf einen sehr kleinen Tiefgangsbereich ausgelegt und optimiert werden kann. Der Verband weist eine Breite von 11,45 m auf, während das Schubschiff eine Länge von 30 m und der Leichter eine Länge von 80 m misst. Somit können die Schleusen befahren werden.

Das Ziel war es an mindestens 194 Tagen im Jahr einsatzfähig zu sein (bemessen am Jahr 2018). In der Konsequenz wurde ein Schubschiff mit einem Minimaltiefgang von 0,7 m entwickelt. Der Leichter weist bei einem identischen Tiefgang von 0,7 m eine Tragfähigkeit von 193 t auf. Der Entwurfstiefgang des Schubschiffs für Normalwasserbedingungen beträgt 1,0 m. Der Leichter vom Typ Europa IIa weist einen maximalen Tiefgang von 2,1 m auf. Die reduzierte Seitenhöhe genügt, um den Anforderungen der Elbe zu entsprechen, wodurch sich das Kaskogewicht reduzieren lässt. In der Konsequenz lässt sich eine maximale Tragfähigkeit von 1.430 t realisieren. Hierbei soll eine Reisegeschwindigkeit von 10–13 km/h erreicht werden.

Der Antrieb des Schubschiffs erfolgt durch vier Voith-Linear-Jets (VLJ). Die beiden inneren VLJ weisen eine Größe von 710 mm auf, während die äußeren VLJ eine Größe von 630 mm aufweisen. Um den Abtrieb bei Grundberührung zu schützen, sind die äußeren Paare in zwei Skegs untergebracht, welche zudem den Auftrieb bei Minimaltiefgang erhöhen. Die VLJ sind als Primär- und Sekundärtrieb konzipiert. Die beiden kleineren äußeren VLJ dienen zur Fahrt bei kleinstem Tiefgang. Aufgrund der bei extremem Niedrigwasser nicht immer gegebenen Möglichkeit einer adäquaten Zuführung von Wasser zum Propeller erfolgt die Ansaugung von Wasser zu den äußeren VLJ durch zwei seitliche Öffnungen. Diese sind so konstruiert, dass Ventilation, also eine Ansaugung von Luft, weitestgehend unterbunden wird und das benötigte Wasser für den Vortrieb von der Seite zugeführt wird. Bei ausreichender Wassertiefe und größeren Leistungsabfragen werden die inneren VLJ als Booster dazugeschaltet.

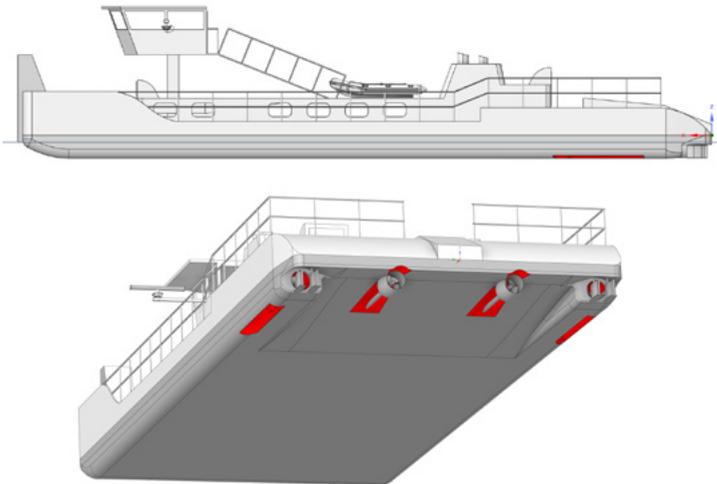


Abb. 10: Maßgeschneiderter Schubschiffsentwurf für die Elbe mit Primär- und Sekundärtrieb, ausgelegt für einen Mindesttiefgang von  $T = 0,7\text{ m}$

### 3.5. Retrofit für Niedrigwasser – die Patentlösung (UDE)

Der Anteil von Neubauten an der gesamten fahrenden Flotte der Binnenschifffahrt ist relativ gering. Pro Jahr werden in Deutschland lediglich wenige niedrigwasserfähige Neubauten in Betrieb genommen. Daher erscheint die nachträgliche Umrüstung von Binnenschiffen, das sogenannte Retro-Fit, als eine sinnvolle Maßnahme. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Lösungsansätze verfolgt.

Der erste Lösungsansatz umfasst die Installation zusätzlicher Auftriebskörper an der Backbord- und Steuerbordseite des Schiffs, wodurch bei gleichbleibendem Tiefgang eine gesteigerte Tragfähigkeit erzielt wird. Dieses Konzept ist aufgrund

der umständlichen Handhabung zusätzlicher Auftriebskörper eher akademischer Natur. Durch die erhöhte Breite wird der Schiffswiderstand und damit die benötigte Leistung zur Erreichung einer gleichen Geschwindigkeit ohne zusätzliche Auftriebskörper wesentlich erhöht.

Die zweite Lösung sieht die Installation von zwei Z-Antrieben, ähnlich einem Außenbordmotor, am Heck des Schiffes an Back- und Steuerbordseite. Die Propeller der Z-Antriebe haben einen deutlich kleineren Propellerdurchmesser als der Primärpropeller und werden nur für die Fahrt bei Niedrigwasser eingesetzt. Reicht der Tiefgang nicht mehr aus, um das Schiff mit dem Primärtrieb zu betreiben, werden diese Antriebe für die Fahrt bei Niedrigwasser eingesetzt. Der Einsatzbereich liegt somit zwischen dem technischen Leertiefgang und dem nautisch erforderlichen Mindesttiefgang. Dieser liegt je nach Schiffstyp zwischen 0,3 und 0,6 m.

Im Projekt wurde ein Binnenschiff vom Typ Europaschiff gewählt, da dieser sowohl auf dem Rhein als auch auf der Elbe anzutreffen ist. Das Schiff hat bei einer Länge von 80 m eine Breite von 9,5 m, sowie einen Maximaltiefgang von 2,5 m. So können an diesem Beispiel ca. 200 t Tragfähigkeit bei einem Tiefgang von 1,1 m bis zu 500 t bei einem Tiefgang von 1,45 m realisiert werden.

Um die Ventilation der Z-Antriebe bei geringen Propellereintauchungsgraden zu vermeiden, wurde eine an der Universität Duisburg-Essen entwickelte und patentierte Düse implementiert. Diese kann durch ihre geometrische Form die Ventilation des Propellers effektiv verhindern und führt zu einem deutlich höheren und homogeneren Propellerschub. Der Düse ist ein kalottenförmiger Vorbau angeschlossen, der die Düse zwischen der 9 und 3 Uhr-Position zur Wasseroberfläche hin abschirmt. Insbesondere kritische Situationen wie Anfahren und Stoppen können durch den Einsatz der so genannten Flachwasserdüse auch unterhalb des nautisch erforderlichen Mindesttiefgangs gefahren werden. Die Flachwasserdüse wurde in Modellversuchen und numerischen Untersuchungen im Freifahrtversuch ohne Schiff und im Propulsionsversuch am Modell eines Europaschiffs beim DST in Duisburg untersucht und mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) seitens der UDE weiter optimiert.

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die im Modellmaßstab 9 ermittelte Schubleistung bei der Verwendung einer Standarddüse und der neu entwickelten Flachwasserdüse. Die Schubleistung der Flachwasserdüse ist insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten, wie sie beim Anfahren auftreten, deutlich höher. Dadurch kann nicht nur schneller, sondern auch auf einem deutlich kürzeren Weg angefahren und gestoppt werden.

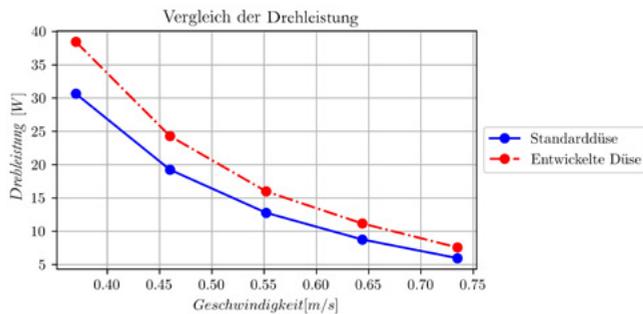


Abb. 11: Vergleich der Schubleistung (Modellmaßstab) mit Standarddüse und mit der im Projekt FlaBi entwickelten Flachwasserdüse (CFD) über die Geschwindigkeit.

Abb. 12 zeigt die Wirbelgeschwindigkeit der Volumenanteile Wasser (blau-grün) und Luft (rot-orange) für die Antriebskonfiguration mit Standarddüse (links) und Flachwasserdüse (rechts). Die Ansicht ist von der Seite. Die Z-Antriebe und der Propeller sind schwarz dargestellt. Die Untersuchung wurde numerisch mit CFD-Methoden unter Pfahlzugbedingungen durchgeführt. Wie zu erkennen ist, sind in der rechten Abbildung keine rot-orangen Bereiche zu sehen, was auf einen effektiven Luftausschluss im Bereich des Propellers schließen lässt.

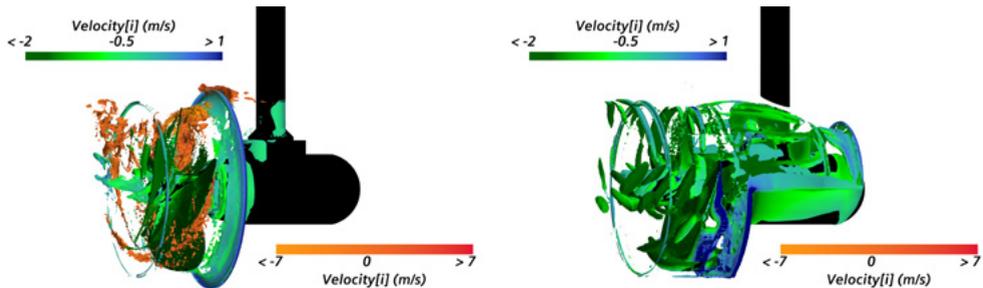


Abb. 12: Darstellung der Geschwindigkeit der Wirbel der Volumenfraktion des Wassers (blau-grün) und der Luft (rot-orange) bei der Konfiguration mit Standarddüse (links) und Flachwasserdüse (rechts).

Die Z-Antriebe mit Flachwasserdüse sind explizit für den Betrieb bei Niedrigwasser und niedrigen Geschwindigkeiten ausgelegt. Sie sind als unterstützende Systeme für kritische Start-, Stopp- und Manövrierszenarien konzipiert, sollen aber in Zukunft zu vollwertigen Antriebssystemen weiterentwickelt werden, um z. B. auch für die Streckenfahrt eingesetzt werden zu können. Das entwickelte Retro-Fit Konzept ist in der Abb. 13 und Abb. 14 zu erkennen.

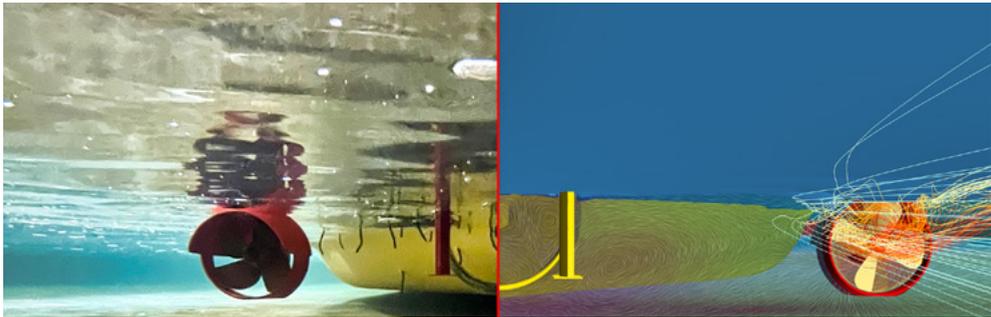


Abb. 13: Vergleich zwischen Modellversuch (links) und CFD (rechts) im Propulsionsversuch der Z-Antriebe mit Flachwasserdüse bei extremem Niedrigwasser.

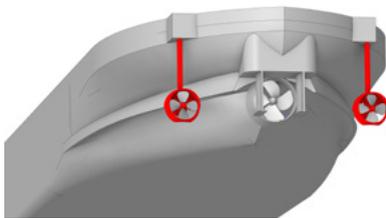


Abb. 14: Retro-Fit Konzept für ein Europaschiff, Erweiterung um einen Sekundärtrieb, ausgelegt für einen Mindesttiefgang von  $T = 1,1\text{ m}$ ,  
Quelle: UDE

#### 4. Zusammenfassung

Zum Ende des Verbundprojekts liegen maßgeschneiderte Schiffsentwürfe mit alternativen und innovativen Propulsionskonzepten und Konstruktionsalternativen vor, die insbesondere den gewässerseitigen Anforderungen des Rheins und der Elbe bei ausgeprägten Niedrigwasserperioden genügen und gegenüber der bestehenden Flotte Vorteile aufweisen.

Durch zahlreiche Voruntersuchungen mit Hilfe von modernsten numerischen Verfahren und neu entwickelten Berechnungsmodellen konnten die Schiffsentwürfe hydrodynamisch optimiert werden. Die technische Machbarkeit einzelner Detaillösungen und die Leistungsfähigkeit ausgewählter Schiffskonzepte wurde mit Modellversuchen im Flachwassertank des DST aufgezeigt und quantifiziert.

#### Danksagung

Das Verbundprojekt FlaBi wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert und vom Projektträger Jülich begleitet.



# Binsmart

## Innovative Technologien für die Binnenschifffahrt

### Autorenliste

Prof. Dr.-Ing. Bettar el Moctar	DST Duisburg
Dipl.-Ing. Jens Ley	DST Duisburg
Dipl.-Ing. Matthias Tenzer	DST Duisburg
Dipl.-Ing. Jan Kaufmann	DST Duisburg
Dipl.-Ing. Berthold Holtmann	DST Duisburg

---

### 1. Motivation und Veranlassung

Zuverlässiger, sicherer und umweltverträglicher Verkehr ist eine elementare Voraussetzung für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Wirtschaft und für wirtschaftliche Prosperität Deutschlands: Die Binnenschifffahrt trägt aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit, Kostengunst, Sicherheit und Zuverlässigkeit und nicht zuletzt durch ihre hohe Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit bereits heute maßgeblich zur Entlastung der hochbelasteten Verkehrsträger Straße und Schiene bei und verfügt angesichts ihrer substanziellen Kapazitätsreserven über weitere Entlastungspotenziale. Sie leistet daher auch einen zentralen Beitrag zur Standorticherung wichtiger Industriezweige in Deutschland. Angesichts dieser gesamtwirtschaftlichen Bedeutung ist die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des systemrelevanten Verkehrsträgers Binnenschifffahrt von grundlegender Bedeutung.

Gleichzeitig sind die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen im Kontext der Binnenschifffahrt gewaltig: Der Klimawandel und die Energiewende erfordern eine Dekarbonisierung der Antriebe sowie innovative Konzepte zur Anpassung der Schiffe an niedrigere Wasserstände. Der Mangel an nautischem Personal sowie sich ändernde Markt- und Nachfragestrukturen führen zu starkem Kostendruck und hoher Wettbewerbsintensität und verlangen nach einer umfassenden Automatisierung sowohl der Navigation, als auch der gesamten Transportketten. Dabei könnte der Anspruch kaum größer sein: nachdem zuvor länger als ein halbes Jahrhundert lang vorhandene Ansätze und Technologien, wie z. B. der Dieselantrieb, die Hydrodynamik oder die Größenentwicklung der Schiffe optimiert wurden, sind die o. g. Transformationen nun innerhalb weniger Jahrzehnte zu realisieren: Hierzu sind durch die Forschung zunächst tragfähige und wettbewerbsfähige Lösungen zu entwickeln und diese dann in kurzer Zeit praktisch für die gesamte Flotte umzusetzen. De facto ist dieser Transformationsprozess eine

nie dagewesene Herausforderung; er kommt einem vollständigen System- und Paradigmenwechsel in mehreren Disziplinen gleich.

Angesichts dieser Herausforderungen steht die Binnenschifffahrt vor einem enormen Umbruch. Sie braucht einen nachhaltigen Innovationsschub, d. h. eine Stärkung der Forschung einschließlich einer substanziellen Einbindung des Gewerbes in die Forschungsaktivitäten. Vor diesem Hintergrund besteht bereits heute eine große Bereitschaft im Gewerbe, insbesondere bei den Reedereien, innovative Lösungen umzusetzen. Gleichzeitig ist die politische Unterstützung zur Stärkung der Forschungsaktivitäten auf Bundes-, Landes- und EU-Ebene hoch. Zahlreiche Forschungsvorhaben und -initiativen z. B. zum automatisierten bzw. autonomen Fahren, zur Entwicklung alternativer Antriebskonzepte und Kraftstoffe, zu flachgehenden Schiffen und binnenschiffsaffiner Logistik sind in Arbeit oder in Vorbereitung. Dabei zielt die Forschung darauf ab, im engen Dialog mit Gewerbe und Verwaltung innovative und zugleich sichere, zuverlässige und wettbewerbsfähige Lösungen zu entwickeln, bei der Weiterentwicklung des Rechtsrahmens mitzuwirken und so die Voraussetzungen für den notwendigen Innovations- und Transformationsprozess zu schaffen.

Das Vorhaben BinSmart hat dieses positive Momentum aufgegriffen. Im Kontext der zunehmenden Zahl an Forschungsaktivitäten und -initiativen steigen der Bedarf und die Notwendigkeit für einen intensiven Austausch und eine umfassende Vernetzung der beteiligten Akteure, für eine Erprobung der Technologien und einen Transfer in die Praxis sowie für eine begleitende Öffentlichkeitsarbeit. Vor diesem Hintergrund umfasste das Vorhaben BinSmart die beiden Schwerpunkte „Begleitforschungsmaßnahme“ und „Technologiedemonstratoren“.

## **2. Begleitforschungsmaßnahme**

Den Nukleus des Vorhabens bildete die Begleitforschungsmaßnahme. Sie richtet sich an Vertreter aus Forschung, Gewerbe und Verwaltung und leistet einen fachlichen, themenoffenen Austausch in allen relevanten Forschungs- und Technologiefragen in der Binnenschifffahrt einschließlich der angrenzenden Logistik und thematisiert projektübergreifende Fragestellungen aus Forschung und Entwicklung. Sie beobachtet darüber hinaus technische Innovationen in anderen Industriezweigen, prüft Möglichkeiten einer Übertragbarkeit auf die Binnenschifffahrt und wirkt mit bei der Reflektion von Vorhaben im Abgleich mit den Forschungszielen und den gesellschaftlich-politischen Zielen. Hieraus resultieren im Dialog Ansätze und Anregungen für zukünftige Forschungsaktivitäten.

Die Treffen der Begleitforschungsgruppe fanden in der Regel zweimal pro Jahr an wechselnden Orten in verschiedenen Binnenschifffahrtsregionen statt, z. B. in Duisburg, Hamburg, Berlin und Karlsruhe. Neben der Präsentation aktueller

Entwicklungen innerhalb von BinSmart bildeten diese Sitzungen regelmäßig den Rahmen für Austausch und Vernetzung der zahlreichen Akteure, Initiativen und Forschungsvorhaben mit ihren vielfältigen Schwerpunkten. Die ein- oder zweitägigen Veranstaltungen umfassten in der Regel etwa 8 bis 12 Fachvorträge zu ausgewählten Forschungsfragen und -vorhaben sowie die Präsentation entsprechender Forschungsinfrastrukturen und Demonstratoren. Das Interesse an diesem Format war durchgehend groß und wurde durch die hohe Zahl an Vertretern unterschiedlicher Initiativen und Organisationen aus Forschung, Gewerbe, Verwaltung und Politik deutlich.



Abb. 1: Referenten der Sitzung der Begleitforschungsgruppe am 21./22.3.2023 in Hamburg

Ein weiteres Format umfasste Workshops mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Hierzu gehörte ein Strategie-Workshop „Zukunftsprognosen zur Automatisierung der Binnenschifffahrt“ ebenfalls mit Teilnehmern aus Wissenschaft, Gewerbe (Schifffahrt und Hafenwirtschaft) sowie Politik und Verwaltung (BMDV, BMWK und ZKR). Dabei wurden Marktperspektiven der Binnenschifffahrt und die zeitliche Entwicklung von Innovationen und Neuerungen reflektiert, die Vision der ZKR zur Automatisierung vorgestellt, mögliche Entwicklungs- und Zukunftspfade der Automatisierung skizziert und erforderliche Handlungsbedarfe abgeleitet. In einem weiteren Workshop mit expliziter Ausrichtung auf Partikuliere wurden technische Modernisierungsmaßnahmen und deren Potenziale in Bezug auf Energieeinsparung und Niedrigwassereignung sowie Erfahrungsberichte zur Schiffsmodernisierung und zur Antragstellung im Rahmen des entsprechenden Förderprogramms reflektiert.

Die Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit wurde durch einen Internetauftritt und die Entwicklung der Projekt-Internetseite unterstützt. Zu den Inhalten gehören beispielsweise die Erläuterung des Ziels und Ansatzes von BinSmart, die Erfassung aktueller Forschungsvorhaben und die Entwicklung einer News-Rubrik, u. a. mit Hinweisen zu aktuellen Tagungen, Förderaufrufen oder sonstigen relevanten Ereignissen und Entwicklungen. Bislang umfassen die Portale rund 88 Forschungsvorhaben und 47 News. Hinzu kommt das im Folgekapitel vorgestellte Portal „Technologiedemonstratoren“.

### **3. Technologiedemonstratoren**

Ein wichtiges Bindeglied zwischen der Forschung und der erfolgreichen Implementierung einer neuen Technologie in den Markt ist die Erprobung und Umsetzung ausgearbeiteter Lösungen unter anwendungsrelevanten Bedingungen. Vor diesem Hintergrund werden Schiffe als reale Plattformen zum Testen und Demonstrieren neuer, zukunftsorientierter Technologien benötigt. Sie können eine schnellere und effizientere Entwicklung ermöglichen, die Abstimmung zwischen verschiedenen Akteuren erleichtern und die Akzeptanz der Technologie bei den Anwendern und Verwertern erheblich steigern. Erst durch den Einsatz und die Prüfung einer Technologie in der Praxis lassen sich zudem belastbare und wirtschaftlich tragfähige Geschäftsmodelle entwickeln. In diesem Kontext wurde im BinSmart-Portal eine eigene Rubrik „Technologiedemonstratoren“ eingerichtet. Sie ermöglicht die Erfassung und Kategorisierung sowohl von Demonstratoren als auch von (digitalen und realen) Testfeldern mit Hilfe eines standardisierten Konzepts im Steckbrief-Format und unterstützt damit die Umsetzung von Technologien auf Technologiedemonstratoren. Das Portal umfasst rund 14 Demonstratoren und Testfelder in verschiedenen Regionen und aus unterschiedlichen Fördertöpfen (Stand September 2024).

Mit dem Schwerpunkt „Technologiedemonstratoren“ wurden die Grundlagen für die Bereitstellung von Demonstratoren für die Binnenschifffahrt gelegt. Hierzu gehörte zunächst die Definition von Auswahlkriterien und Anforderungen an Technologiedemonstratoren und die Entwicklung von Kriterien zur deren Kategorisierung. Zunächst wurde eine Online-Umfrage durchgeführt, um den Bedarf an Demonstratoren für die Binnenschifffahrt zu ermitteln. Unter den knapp 30 Teilnehmenden befanden sich Akteure aus der Forschung, Verbandsvertreter, Schiffsbetreiber und Vertreter von Zulieferfirmen. Die Ergebnisse der Umfrage sowie der Arbeiten zu den Anforderungen an Technologiedemonstratoren wurden in einem ausführlichen Meilensteinbericht dokumentiert und veröffentlicht. Sie dienen zugleich als Grundlage für die Entwicklung eines Technologiedemonstrators für die Binnenschifffahrt im Projekt BinSmart.

Das Ziel war es, einen technologieoffenen, modularen und innovativen Demonstrator zu konzipieren, der als „Ship-in-Service“ einsetzbar ist. Gemäß den Definitionen im zuvor zitierten Dokument handelt es sich um eine offene Demonstrationsplattform und nicht um einen projektbezogenen spezifischen Demonstrator. Unter dem Begriff „Ship-in-Service“ wird verstanden, dass das Schiff in der Regel für konventionelle Transportaufgaben eingesetzt wird und zeitweise zu Forschungszwecken von Wissenschaftlern gechartert werden kann, um verschiedene Zukunftstechnologien zu erproben. Es geht hier z. B. um neue Antriebstechnologien (Energieträger, Speichertechnologien, Energiewandler und Propulsionstechnologien) sowie Technologien zum automatisierten Fahren. Der Bau des Demonstrator-schiffes ist jenseits von BinSmart vorgesehen.

In Zusammenarbeit mit der Rhenus Schiffsmanagement GmbH wurde in BinSmart ein Schiffsentwurf erarbeitet, der die oben genannten Ziele erfüllt. Die folgende Tab. 1 fasst die wesentlichen Parameter und Eigenschaften des entwickelten Technologiedemonstrators für die Funktion als konventionelles Frachtschiff zusammen.

Tab. 1: Hauptparameter und Eigenschaften des entwickelten Technologiedemonstrators (ein Auszug)

<b>Parameter</b>	<b>Beschreibung</b>
Schiffstyp	Trockenfrachtschiff für europäischen Binnenwasserstraßen
Propulsionskonzept	2 Schrauber mit konventionellen Düsenpropellern und dynamischer Tunnelschürze
Ladungsart	Stückgüter, Schüttgüter, Projektladung, Container, ADN-Container
Hauptabmessungen	L = 86 m x B = 9,5 m (Länge x Breite)
Tiefgang	T = 2,8 m. Einsetzbar ab einem Tiefgang von T = 0,95 m
Seitenhöhe	D = 3,25 m
Fixpunkthöhe	unter Ballast 4,10 m
Tragfähigkeit	ca. 1450 t
Klassifikation	ohne
Betriebsform	A1, A2, B-Fahrt

Die Schiffslänge von 86 m verteilt sich wie folgt auf die fünf Bereiche des Schiffes:

- Vorschiffslänge 9,5 m
- Laderaumlänge 61,0 m
- Hinterschiffslänge 13,0 m
- Achterpieklänge 2,5 m

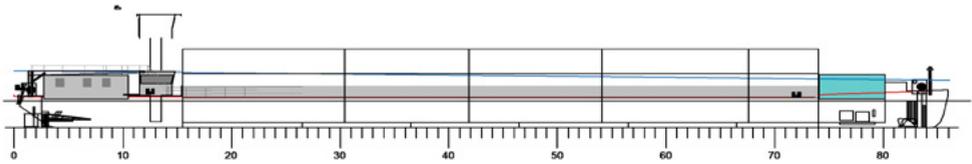


Abb. 2: Seitenansicht des Schiffsentwurfs mit Containerbeladung

In dem hybriden Konzept werden die elektrischen Antriebsmotoren der Propulsionsanlage im Heck über Energiewandler im Vorschiff versorgt. Die notwendige Antriebsenergie wird von einem Dieselgenerator der neuesten Generation, zwei Brennstoffzellen und einem Batteriesystem zur Verfügung gestellt. Der Antrieb des Schiffes kann so teilweise mit Wasserstoff erfolgen. Das Brennstoffzellensystem soll in der Lage sein, ca. 200 kW elektrische Leistung für die Antriebsleistung zur Verfügung zu stellen. Die Batterie mit einer Kapazität von 300 kWh wird hauptsächlich als Pufferspeicher für Brennstoffzelle und Dieselgenerator dienen. Ein Powermanagementsystem sorgt für eine intelligente Verteilung der Energie an Bord. Dieses allgemeine hybridelektrische Antriebskonzept ermöglicht zukünftig den Austausch und Einsatz von alternativen Energiewandlern. Der Schiffsentwurf ist so gestaltet, dass vor dem Laderaum Stellplätze für Energiecontainer angeordnet sind, siehe Abb. 3. Diese befinden sich auf einem Deck ca. 2,3 m über Basis. Unter den Energiecontainern sind horizontale Montage-luken zur Gewährleistung einer guten Zugänglichkeit und Austauschbarkeit der im Vorschiff befindlichen Energiewandler installiert.

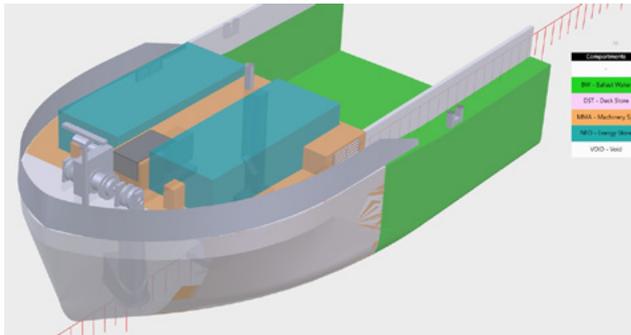


Abb. 3:  
Bugansicht des Schiffsentwurfs  
mit Energiecontainern

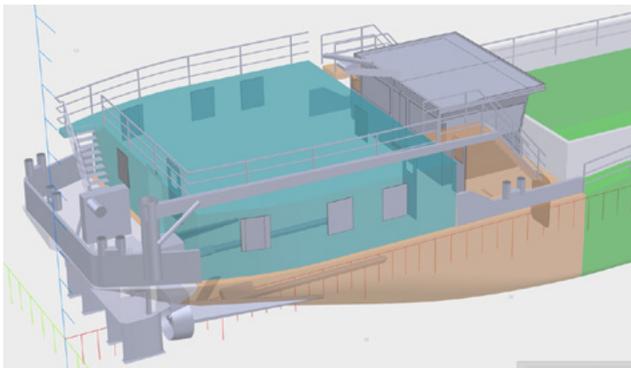


Abb. 4:  
Heckansicht des  
Schiffsentwurfs

Die Abb. 4 veranschaulicht den Basisentwurf des Hecks. Es ist zu erkennen, dass die Wohnung über die gesamte Breite des Schiffes angeordnet ist. Auf eine elastische Lagerung der Wohnung kann verzichtet werden, da im darunter liegenden Maschinenraum keine Verbrennungsmaschinen vorgesehen sind, die Einfluss auf die Schallwerte in der Wohnung haben oder zu Vibrationen führen könnten. Das Geländer auf der Wohnung ist klappbar bzw. demontierbar, um die Fixpunkthöhe einzuhalten.

Der Zugang zum Achterdeck erfolgt ausschließlich über das Dach der Wohnung. Die Abmessungen und die Grundfläche betragen ca. 7,8 m x 9,2 m bzw. 70 m<sup>2</sup>. Der Zugang zur Wohnung von vorne ist auf der Steuerbordseite. Der zweite Zugang zur Wohnung ist an der Rückseite vom Achterdeck aus.



Abb. 5:  
Grundriss der  
achterlichen Wohnung

Die Abb. 5 zeigt eine Skizze der Raumaufteilung der achterlichen Wohnung. Es sind drei Einzelkabinen vorgesehen. Eine vierte Kabine ist von der Messe aus zugänglich und kann bei Bedarf (beispielsweise für zusätzliche Wissenschaftler) genutzt werden, andernfalls kann dieser Raum als Lager dienen. In den Räumlichkeiten des Schiffsführers befindet sich ein Bad, die zweite und dritte Kabine teilen sich einen Waschaum.

Der unter der Wohnung liegende Raum wird bei diesem Schiff als Betriebsraum bezeichnet. Diese Benennung weist auch auf den Umstand hin, dass sich hier keine Maschinen der Energieerzeugung mehr befinden. Im Betriebsraum sind folgende Systeme vorgesehen:

- Elektrische Antriebsmotoren ohne Getriebe
- Stromversorgung über 480 V Drehstrom-Leistungskabel auf der Backbord-Seite
- Umformer DC/AC für die Antriebsmotoren
- Kreislauf-Wasserkühlung
- Batterieraum und Batteriesystem mit 300 kWh
- Schaltschrank, Stromversorgung Bordsysteme
- Niedergang auf der Steuerbord-Seite
- Ballastpumpe mit Ventilgruppe

- Feuerlöschpumpe
- Zu- und Abluft über elektrische Ventilatoren
- Kabel zur Datenübertragung auf der Steuerbord-Seite
- Tanks für Trinkwasser und Grauwasser
- Schacht für die Hubsäule des Steuerhauses mit Kabelanlagen zur Strom- und Datenübertragung
- Ruderhydraulik, Steuerhaushydraulik, Klimageräte

Im Zuge der Entwicklung des Basisentwurfs wurde zudem die Rumpfform und das Propulsionskonzept erarbeitet, siehe Abb. 6 und vgl. Tab. 1.

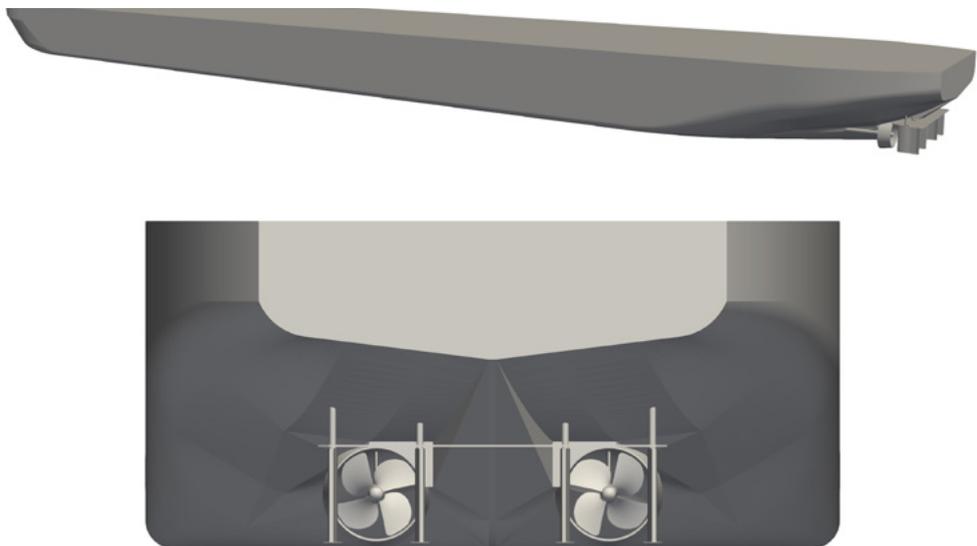


Abb. 6: Seitenansicht des Rumpfes (oben), Propulsionskonzept (unten)

Mit Hilfe von numerischen Simulationen mit der quelloffenen CFD-Toolbox OpenFOAM 10 wurde eine Variantenstudie mit 11 verschiedenen Bugformen bei 3 Vorausschwindigkeiten, für den beladenen Zustand ( $T = 2,8 \text{ m}$ ) und bei einer Wassertiefe von  $h = 5 \text{ m}$  durchgeführt. Als Entscheidungsgrundlage für die Wahl der Bugform wurden die rumpfinduzierten Wellen, der mit der Verdrängung normierte Rumpfwiderstand, der dynamische Trimm und der Absenk verwendet. Nach Auswahl der Bugform folgte eine Heckformoptimierung mit Hilfe der Software CAESES 5.2 unter Berücksichtigung der Propellerwirkung. Es wurde ein

moderner Ansatz verfolgt, bei dem in einem vordefinierten Bereich und unter vordefinierten Randbedingungen (wie z. B. die Mindestgesamtverdrängung, Ausdehnungsgrenzen) Geometrieverformungen automatisiert vorgenommen und anschließend simuliert wurden. Durch die Heckformoptimierung konnte ein weiteres Energieeinsparpotenzial von etwa 4,5 % gegenüber der Ausgangsform erzielt werden. Die Ergebnisse dieser Studie sind ausführlich in Lyu (2024) beschrieben, [1].

Zuletzt erfolgten numerische Untersuchungen zur Bestimmung der Manöviereigenschaften. Die beiden folgenden Abbildungen veranschaulichen exemplarische Ergebnisse der umfangreichen CFD-Studie.

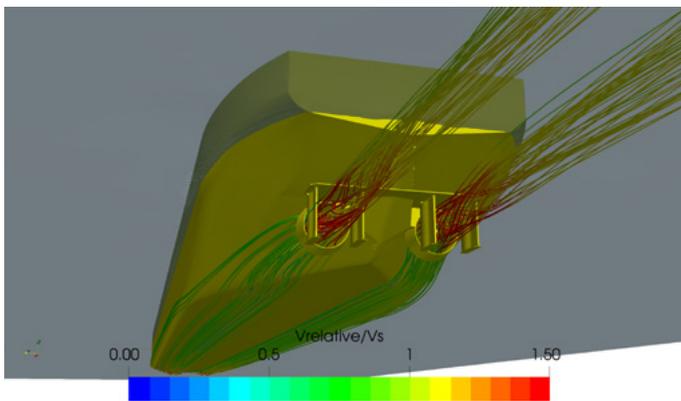


Abb. 7:  
Stromlinien durch die Propellerebene als Ergebnis einer Propulsionssimulation für  $T = 2,8 \text{ m}$ ,  $V = 10 \text{ km/h}$  und  $h = 5 \text{ m}$

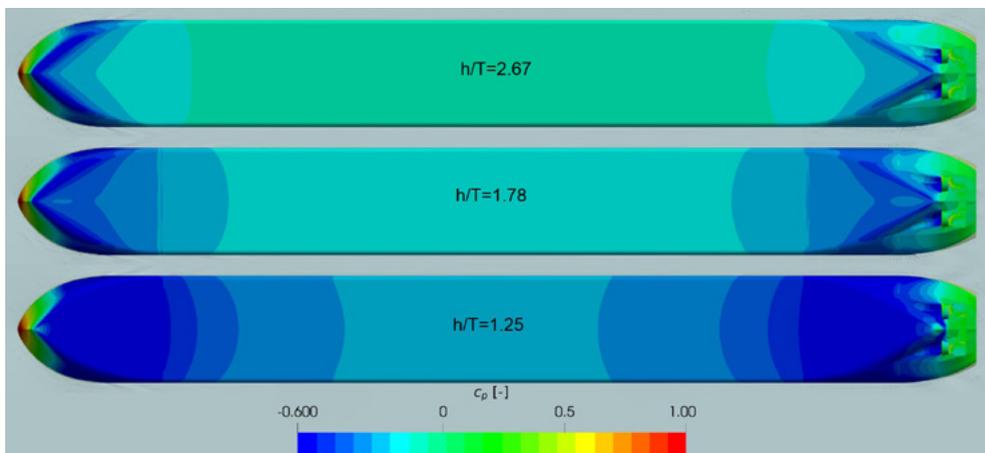


Abb. 8: Einfluss des Wassertiefen-Tiefgangsverhältnisses  $h/T$  auf den Druckbeiwert am Rumpf, Ansicht von unten

Komplementär zu den numerischen Simulationen wurden folgende Modellversuchskampagnen durchgeführt.

1. Propellerfreifahrten
2. Anfahrversuche
3. Widerstandsversuche
4. Propulsionsversuche
5. Stoppversuche
6. Manövrierversuche (mit und ohne Ruderwirkung)

Die Versuche dienen der Quantifizierung der Eigenschaften des Schiffes und waren zugleich die Grundlage für die Bauspezifikation. So wurden z. B. die Leistungsbedarfskurven, Manövrierkoeffizienten, das Anfahr- und Stoppvermögen ermittelt. Die folgenden Bilder zeigen verschiedene Ansichten des gebauten und untersuchten Schiffmodells im Flachwassertank des DST.



Abb. 9: Schiffmodell an der PMM-Anlage mit einem statischen Driftwinkel



Abb. 10: Unterwasseraufnahme bei gelegtem Ruderwinkel ( $\delta = 60^\circ$ ) und stehenden Propellern (links) sowie Hinterschiff mit ausgetauchten Propellern (rechts)

Im letzten Schritt wurde unter Nutzung aller vorherigen Entwicklungen und ermittelten Daten ein Schiffsmodell für den Schiffsführungssimulator SANDRA II erarbeitet. Die beiden folgenden Abbildungen illustrieren das Ergebnis: Das entwickelte Schiff ist auf der Fahrt in der Gebirgsstrecke des Rheins bei Kaub bei einem kleinen Tiefgang von  $T = 1,0$  m mit Teilbeladung zu sehen. Das fahrdynamische Verhalten des Schiffes kann am Fahrsimulator erprobt werden.

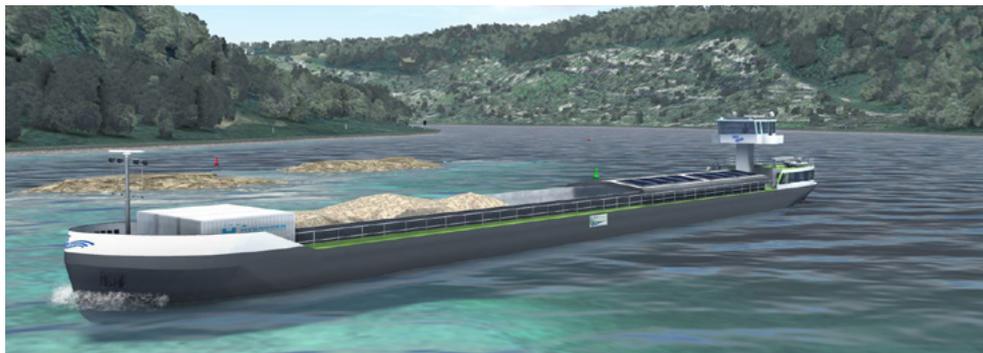


Abb. 11: Bergfahrt des entwickelten Technologiedemonstrators in der Gebirgsstrecke des Rheins

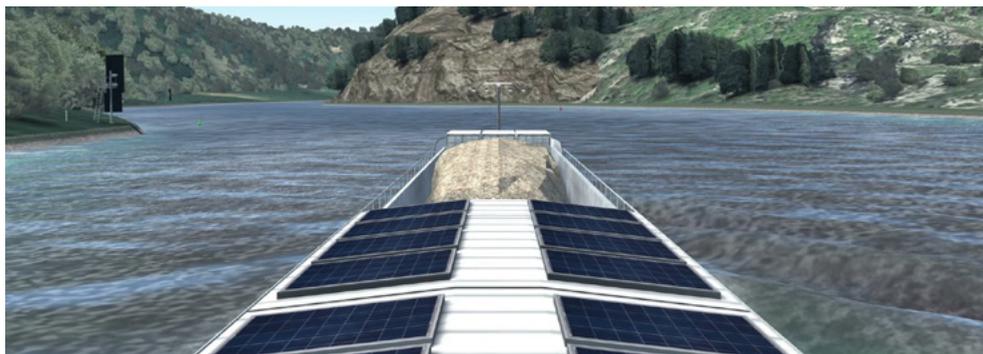


Abb. 12: Blick aus dem Steuerhaus auf den teilgefüllten Laderaum und das mit Solarpaneelen ausgestattete Lukendach

#### **4. Zusammenfassung und Ausblick**

BinSmart gilt als die erste und bislang einzige Begleitforschungsinitiative mit explizitem Fokus auf die Binnenschifffahrt und die binnenschiffsaffine Logistik. Als Plattform für den gegenseitigen Austausch bietet BinSmart den Raum für eine intensive Vernetzung zahlreicher Akteure, Initiativen und Forschungsvorhaben mit unterschiedlichen Inhalten und Schwerpunkten und für den Transfer der Ergebnisse. Der integrative Charakter des Vorhabens wird auch dadurch deutlich, dass BinSmart als Podium und Forum gezielt von Akteuren aus verschiedenen Regionen und Vorhaben aus verschiedenen Förderprogrammen genutzt wird, beispielsweise aus dem maritimen Forschungsprogramm (BMWK), dem Programm Digitale

Testfelder an Bundeswasserstraßen (DTW I & II, BMDV) dem Programm Innovative Hafentechnologien (IHATEC, BMDV) oder dem Programm Horizon Europe. Dabei reicht das Spektrum der Teilnehmer von der Forschung und Vertretern des Gewerbes (Reedereien und Partikuliere) über die Verwaltung bis hin zu Vertretern der Politik aus verschiedenen Ministerien, z. B. BMWK und BMDV.

Insgesamt wird der Nutzen des Vorhabens BinSmart für die Binnenschifffahrt und das Gewerbe vor allem darin gesehen, dass der intensive Erfahrungs- und Informationsaustausch und die Vernetzung der zahlreichen Akteure und Forschungsinitiativen maßgeblich zur Stärkung der Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit der Binnenschifffahrt als systemrelevantem Verkehrsträger und damit auch zur Standortsicherung wichtiger Industriezweige in Deutschland beitragen. Angesichts dieser sehr positiven Bewertung ist eine Fortsetzung des Vorhabens BinSmart vorgesehen.

Bei der angestrebten Fortsetzung soll das Spektrum der bisherigen Aktivitäten ergänzt und in modifizierter Form weitergeführt werden. Insbesondere das erfolgreiche Format der Begleitforschungsgruppe soll dabei wieder im Vordergrund stehen. Ein weiterer, neuer Schwerpunkt zielt auf die Verbesserung des Innovationstransfers. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die weniger forschungsauffine Gruppe der Partikuliere gelegt und ein Innovationstransfer unter den besonderen Anforderungen dieser Nutzergruppe angestrebt. Hinzu kommen wiederum die entsprechende Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit. Mit diesem erweiterten Profil soll das Vorhaben BinSmart II zu der zentralen Begleitforschungsinitiative für die deutsche Binnenschifffahrt ausgebaut werden.

Neben der etablierten Begleitforschungsinitiative wurde in diesem Projekt ein technologieoffener Demonstrator entwickelt, der als „Ship-in-Service“ dienen kann und zukünftig für Zwecke der Forschung und Entwicklung gechartert werden könnte. Das Projekt endet mit der Baubeschreibung des Demonstrators. Der Bau des Demonstratorschiffes wird jenseits von BinSmart unter Verwendung der Projektergebnisse angestrebt.

### **Danksagung**

Das Projekt BinSmart wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert und vom Projektträger Jülich begleitet.

## **Literatur**

[1] Wenjing Lyu, Jan Kaufmann, Jens Ley, Matthias Tenzer, Thomas E. Schellin, An efficient method to simulate ship self-propulsion in shallow waters and its application to optimize hull lines, Ocean Engineering, Volume 312, Part 2, 2024.

# Imokat II

## Entwicklung eines innovativen Methanoxidationskatalysators zur Senkung der Abgasemissionen von Großmotoren für maritime und stationäre Anwendung im Gasbetrieb

### Autorenliste

**Dr.-Ing. Franz Koschany**  
**Manuel Materna**

MAN Energy Solutions SE, Augsburg  
MAN Energy Solutions SE, Augsburg;  
Technische Universität München

**Dr.-Ing. Hans-Philipp Walther**

MAN Energy Solutions SE, Augsburg

**Dr. Mathias Moser**

MAN Energy Solutions SE, Augsburg

**Dr. Daniel Mack**

Interkat Catalyst GmbH, Königswinter

**Alexander Nieratschker**

Interkat Catalyst GmbH, Königswinter

**Dr. Jörg Spengler**

Interkat Catalyst GmbH, Königswinter

**Anne Niederdränk**

Technische Universität München,  
Lehrstuhl I für Technische Chemie

**Prof. Dr.-Ing. Kai-Olaf Hinrichsen**

Technische Universität München,  
Lehrstuhl I für Technische Chemie

---

### 1. Einleitung

Die Dekarbonisierung ist eine der größten Herausforderungen unserer Gesellschaft. Mit einem Anteil von 3 % an den jährlichen weltweiten Treibhausgasemissionen leistet die Schifffahrt einen signifikanten Beitrag der entsprechend reduziert werden muss. Deshalb hat die Europäische Union im Rahmen der Green-Deal-Initiative das Fit-for-55-Programm gestartet und dieses auch auf die maritime Wirtschaft ausgebreitet. Ziel ist es, die Treibhausgasemissionen bis 2050 schrittweise zu reduzieren und 2050 eine Reduktion von 80 % erreichen<sup>[1]</sup>.

Darüber hinaus wird der Schifffahrtssektor in das Emissionshandelssystem (ETS) der EU mit einbezogen, welches 2024 beginnt und 2027 vollständig in Kraft tritt. Neben CO<sub>2</sub> werden ab 2027 auch CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O im ETS berücksichtigt<sup>[2]</sup>. Zusätzlich hat auch die Internationale Seeschifffahrts-Organisation (IMO) ein Rahmenwerk zur Reduzierung von Treibhausgasen erlassen<sup>[3]</sup>.

Für die maritime Dekarbonisierung gibt es bisher keine Patentlösung. Wahrscheinlicher ist, dass verschiedene Technologien und Kraftstoffe benötigt werden, basie-

rend auf Verfügbarkeit und spezifischer Anwendung. Neue - und in Zukunft nachhaltig produzierte - Kraftstoffe sind ein wichtiger Eckpfeiler auf diesem Weg. Auf dem Weg zu diesen Kraftstoffen wird Liquefied Natural Gas (LNG) ein Übergangskraftstoff sein oder kann in Zukunft eine weitere Option sein, wenn es CO<sub>2</sub>-neutral produziert wird. Der große Vorteil von LNG ist, dass der Kraftstoff, die Technologie und die Infrastruktur bereits existieren. Der Wechsel von einem mit Schweröl betriebenen Motor zu einem LNG-betriebenen Motor kann die CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 25 % reduzieren<sup>[4]</sup>. Darüber hinaus sind die Emissionen von Partikeln und SO<sub>x</sub> nahezu null. Aufgrund des Verbrennungsprinzips sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen sehr niedrig und können IMO Tier III ohne Nachbehandlung erfüllen. In Bezug auf die Treibhausgasemissionen sind die Methanemissionen solcher Motoren entscheidend und müssen auf ein Minimum reduziert werden. Methan hat ein Treibhausgasäquivalent von 29,8 (GWP 100) im Vergleich zu CO<sub>2</sub><sup>[5]</sup>. Selbst wenn grün produziertes synthetisches LNG verfügbar ist und ein nahezu CO<sub>2</sub>-neutraler Betrieb erreicht werden könnte, würde der Methanschluß die Reduzierung des Treibhausgaseffekts teilweise untergraben. Daher bleibt die Minderung des Methan-Schlupfes auch in Zukunft wichtig.

## **2. Reduktion von Methanemissionen von Großmotoren - Stand der Technik**

Grundsätzlich sollte zur Reduktion der Methanemissionen die Optimierung der Verbrennungsprozesse, der Geometrie des Brennraumes, sowie der Brennstoffzuführung im primären Fokus stehen, da mit diesen Methoden Methanschluß einfach reduziert werden kann. Im Bereich der Zweitaktmotoren wird beispielsweise über die Hochdruck-Methandosierung mit anschließender diffuser Verbrennung ein minimaler Methanschluß erreichbar<sup>[6]</sup>. In Zukunft könnte es jedoch notwendig sein, zusätzliche Methoden in Form von Abgasnachbehandlung einzusetzen, um potentielle Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Da die Katalyse eine bekannte Technologie im Bereich der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) ist, stellt ein Methanoxidationskatalysator (MOC) eine Möglichkeit zur Nachbehandlung von CH<sub>4</sub>-haltigen Abgasen dar. Weitere Möglichkeiten umfassen die regenerative thermische Oxidation (RTO) oder neue Ansätze wie die Plasmareduktion<sup>[7]</sup>. Aus verschiedenen Gründen, wie dem notwendigen Einbauraum im Fall von RTO oder dem technologischen Reifegrad in Kombination mit einem enormen Energieverbrauch bei Plasmaanwendungen, wird von MAN-ES für eine maritime Anwendungen eine katalytische Lösung verfolgt.

Allerdings stellen maritime Anwendungen große Herausforderungen für CH<sub>4</sub>-Oxidationskatalysatoren dar, die in Form von Systemen mit Edelmetallen (PGM) nach dem aktuellen Stand der Technik verfügbar sind. Eine Abnahme der Katalysatoraktivität wird immer beobachtet, da Wasser und SO<sub>2</sub> Bestandteile des Abgases sind und zur Deaktivierung führen. SO<sub>2</sub> tritt verstärkt bei Zweistoffmotoren (DF, Dual Fuel) auf, welche bei maritimen Anwendungen immer zum

Einsatz kommen, ist jedoch auch bei reinen Gasmotoren zum Einsatz in Kraftwerken signifikant vorhanden. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Katalysatoraktivität während einer angemessenen Lebensdauer aufrechtzuerhalten. Dazu gehören die periodische Regeneration des Katalysatormaterials, die Installation eines Bypasses zum Schutz des Katalysators vor Schadstoffen während des Dieselbetriebs, die Installation eines vorgelagerten Schutzbetts zur Entfernung von Katalysatorgiften oder die Verwendung von schwefelfreiem Kraftstoff. Diese zusätzlichen Installationen erfordern oft viel Einbauraum. Besonders im Bereich der Nachrüstlösungen ist dies ein kritisches Thema und oft ein Ausschlusskriterium. Eine weitere sehr kostspielige Möglichkeit ist die Bereitstellung zusätzlicher, edelmetallbestückter, Katalysatormengen, um die Alterungseffekte auszugleichen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es nach dem aktuellen Stand der Technik kein stabiles  $\text{CH}_4$ -Oxidationskatalysatorsystem auf dem Markt gibt<sup>[6]</sup>. Daher wurde von MAN bereits im Jahr 2017 im Projekt IMOKAT I die Entwicklung eines alterungsstabilen Methanoxidationskatalysators angefangen<sup>[8]</sup>.

### **3. Weiterentwicklung des Katalysators aus IMOKAT I durch Interkat Catalyst und MAN Energy Solutions SE**

In gemeinsamen Entwicklungsrunden wurde die Imokat I Technologie zusammen mit den Projektpartnern von Interkat im Hinblick auf Katalysatorleistung und gleichzeitiger serieller Fertigarbeit weiterentwickelt.

Bei der Optimierung des Katalysators wurden zunächst im Rahmen eines großangelegten Laborscreenings bei Interkat verschiedene Kerne 1" x 3" beschichtet und am Synthesegasteststand vermessen. Anhand der gemessenen Methanaktivitäten wurden die vielversprechendsten Formulierungen für die Beschichtung größerer Keramiksubstrate ausgewählt. Zum Beschichten der Substrate, wurden die Washcoats weiter verbessert. Unter anderem wurden verschiedene Bindertypen und Bindermengen erprobt, welche die Haftung auf dem Keramikträger verbessern. Außerdem wurde die Rheologie des Washcoats optimiert, um eine gleichmäßige Beschichtung mit hoher Schichtdicke zu ermöglichen. Die vielversprechendsten Katalysatoren wurden bei MAN am Synthesegasteststand vermessen. Hierbei wurden neben der Methanaktivität auch die Aktivität in der Oxidation von CO und Formaldehyd, sowie die Schwefelbeständigkeit und die hydrothermale Stabilität überprüft. Im Hot-shake-Test konnte außerdem gezeigt werden, dass die Haftung des Washcoats auch bei hohen Temperaturen und hohen Beschleunigungen über viele Stunden gewährleistet ist. Schließlich wurde eine Washcoatformulierung ausgewählt und die optimale Washcoatbeladung ermittelt. Die Washcoatherstellung und Beschichtung wurde bei Interkat erfolgreich vom Labormaßstab in den Produktionsmaßstab übertragen. Für Motorversuche bei MAN wurden 20 Katalysatoren im Maßstab 13" x 8" gefertigt.

Erreicht wurde, wie in Abb. 1 dargestellt, eine Erhöhung des  $\text{CH}_4$  Umsatzes bei gleichen Reaktionsbedingungen. Im angestrebten Temperaturbereich zwischen  $530^\circ\text{C}$  und  $590^\circ\text{C}$  konnte eine Erhöhung des Methanumsatzes gegenüber dem Ausgangsmaterial aus dem Projekt IMOKAT I erreicht werden. Die Ergebnisse in der Abbildung stellen die Aktivität der Katalysatoren nach 100 h hydrothormaler Alterung dar. Die dargestellten IMOKAT II Daten basieren auf dem finalen Katalysatorsystem, welches für die Motorversuche ausgewählt wurde.

Zusätzlich konnten im Bereich der CO-Umsetzung deutliche Fortschritte gemacht werden. Wie in Abb. 2 zu sehen, wurde bei der IMOKAT I Technologie im Temperaturbereich unter  $510^\circ\text{C}$  noch zusätzliches CO aus dem  $\text{CH}_4$  erzeugt, dargestellt durch einen negativen CO-Umsatz. Erst mit Erreichen von höheren Temperaturen konnte das CO vollständig umgesetzt werden. Der IMOKAT II Katalysator überzeugt hingegen über ganzen untersuchten Temperaturbereich mit einer vollständigen CO-Umsetzung.

Des Weiteren konnte jeweils für den IMOKAT I und IMOKAT II Katalysator die Stabilität für 100 h gegenüber 50 ppm  $\text{SO}_2$  im Abgas nachgewiesen werden.

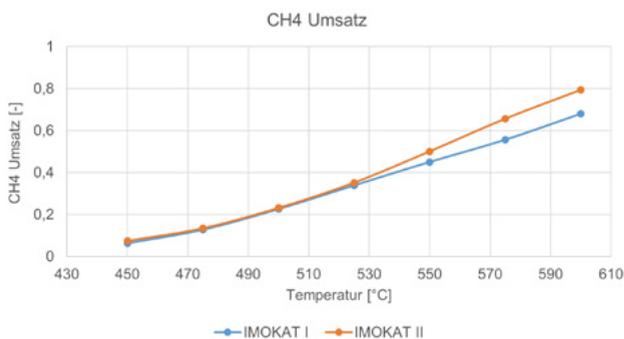


Abb. 1: Verbesserung der  $\text{CH}_4$  Umsätze im Vergleich zum Vorgängerprojekt IMOKAT I

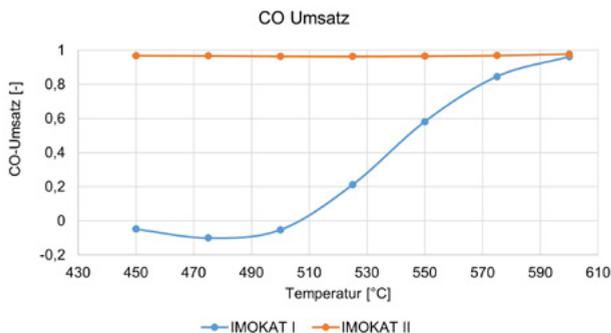


Abb. 2: Verbesserung der CO Umsätze im Vergleich zum Vorgängerprojekt IMOKAT I

#### 4. Grundlagenforschung zur Katalyse an der TUM

Da die Methanoxidation zu Kohlendioxid über Eisen-Zeolithe bisher noch nicht umfassend untersucht wurde, wurden an der TU München eingehende Studien zu diesem Thema durchgeführt, um die zugrunde liegenden Mechanismen und die Effektivität verschiedener Syntheseverfahren besser zu verstehen. Dafür wurden Eisen-Zeolithe auf unterschiedliche Weise synthetisiert, indem der Ausgangszeolith durch Festkörperionenaustausch (M), Imprägnierung (I) oder Flüssigionenaustausch (F) mit Eisen beladen wurde. Die Aktivität der Katalysatoren im Vergleich zum Ausgangszeolithen sowie dem IMOKAT II Katalysator sind in Abb. 3 dargestellt.

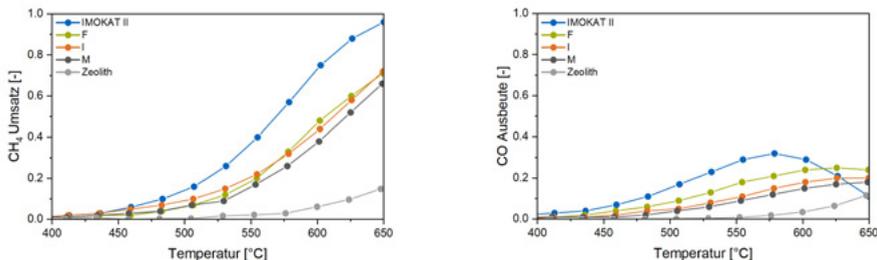


Abb. 3: Methanumsatz (links) und Kohlenmonoxidausbeute (rechts) der getesteten Katalysatorsysteme in Abhängigkeit der Temperatur.

Die Ergebnisse zeigen, dass Eisen als aktive Komponente die Methanoxidation signifikant beschleunigt. Außerdem hat das angewendete Syntheseverfahren einen Einfluss auf die Distribution und Art der Eisenspezies, sowie die Azidität des Katalysators. Durch einen höheren Anteil an Eisen, der in die Zeolithstruktur inkorporiert ist, sowie einer höheren Azidität, werden höhere Methanumsätze erreicht. Dies spiegelt sich auch bei einem Vergleich des IMOKAT II Katalysators mit den restlichen Katalysatoren wieder. Unabhängig von der Synthesemethode werden bei niedrigen Temperaturen sowohl CO<sub>2</sub> wie auch CO gebildet. Bei einem Methanumsatz von etwa 60 % wird ein Maximum in der CO-Ausbeute erreicht, woraufhin die Bildung von CO<sub>2</sub> zunehmend bevorzugt wird.

Daneben wurde auch der Einfluss verschiedener Reaktionsparameter auf die Methanoxidation umfassend analysiert. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Oxidation von Methan durch hohe Prozessdrücke und hohe Sauerstoffkonzentrationen im Feed begünstigen lässt. Auch wenn Sauerstoff im Reaktionsverlauf im Überschuss vorhanden ist, lässt sich durch höhere O<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-Verhältnisse der Methanumsatz verbessern. Um mögliche inhibitorische Effekte der Reaktionsprodukte auf den Reaktionsverlauf zu untersuchen, wurden zusätzlich die Reaktionsbedingungen durch Zugabe von CO<sub>2</sub>, CO und Wasser variiert. Weder CO<sub>2</sub> noch CO zeigten einen signifikanten Einfluss auf den Methanumsatz, die Reaktionspro-

dukte üben demnach unter den gegebenen Bedingungen keine stark hemmende Wirkung auf die Methanoxidation aus. Durch die Zugabe von CO im Feed konnte die Selektivität des gewünschten Produktes  $\text{CO}_2$  erhöht werden. Im Gegensatz dazu wirkt Wasser hemmend auf die Reaktion. Diese Inhibierung von Wasser könnte auf eine Blockierung der aktiven Zentren im Katalysator zurückzuführen sein, was die Effizienz der Methanoxidation verringert.

Zusätzlich wurde auch die Auswirkung von  $\text{NO}_x$  auf die Methanoxidation genauer untersucht. Wie bereits in IMOKAT I gezeigt wurde, kann durch die Anwesenheit von  $\text{NO}_x$  die Methanoxidation erheblich verbessert werden[8]. Hierdurch kann die Oxidation von Methan nicht nur durch Sauerstoff erfolgen, sondern auch durch das stärkere Oxidationsmittel  $\text{NO}_2$ . Zusätzlich zur Methanoxidation findet dabei simultan SCR von  $\text{NO}_x$  statt, wobei Methan als Reduktionsmittel dient, um  $\text{NO}_x$  zu Stickstoff zu reduzieren. Ein wichtiger Aspekt der  $\text{NO}_x$ -Reduktion mit Methan ist, dass  $\text{NO}_x$  zunächst zu  $\text{NO}_2$  oxidiert werden müssen, bevor die eigentliche SCR-Reaktion stattfinden kann. Diese Beobachtung legt nahe, dass eine Voroxidation der  $\text{NO}_x$ -Komponenten entscheidend für die Effizienz des gesamten Prozesses ist. Die verschiedenen Eisen-Zeolith-Katalysatoren, die mittels unterschiedlicher Synthesemethoden hergestellt wurden, wurden außerdem auf ihre Eignung zur simultanen Methanoxidation und SCR getestet. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Durch die Zugabe von  $\text{NO}_x$  sind die Katalysatoren bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen aktiv. Hierbei spielen Eisenspezies und Azidität des Katalysators im Vergleich zur reinen Methanoxidation ohne  $\text{NO}_x$  eine untergeordnete Rolle auf die Oxidation von Methan. Im Gegensatz zum Methanumsatz haben Menge und Art der Eisenspezies einen Einfluss auf den  $\text{NO}_x$ -Umsatz.

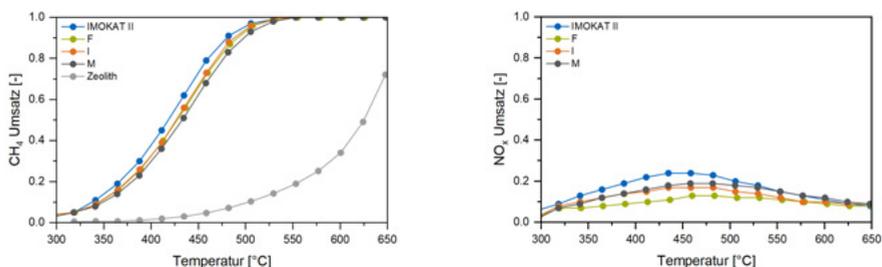


Abb. 4: Methanumsatz (links) und  $\text{NO}_x$ -Umsatz (rechts) der getesteten Katalysatorsysteme in Abhängigkeit der Temperatur bei einem  $\text{CH}_4/\text{NO}_x$ -Verhältnis von 5.

## 5. Vollmotorenversuche bei MAN Energy Solutions

Zum ersten Test der Katalysator-technologie unter realen Einsatzbedingungen wurde ein 23/30 DF Genset Motor ausgewählt. Zur Bestimmung der Möglichkeiten bereits durch Verbrennungsoptimierung innermotorisch  $\text{CH}_4$  Ausstoß zu Reduzieren und optimalere Betriebsbedingungen für den Katalysator herzustellen,

wurde in einem Vorversuch der Motor alleine betrieben und der Einbau eines Reaktors vor Turbolader mittels Blenden simuliert. Auf Basis der Versuchsergebnisse konnten grundlegenden Auslegungskriterien für das Reaktordesign wie beispielsweise die maximale Abgastemperatur und das notwendige Katalysatorvolumen abgeleitet werden. Aufgrund der benötigten hohen Temperaturen für die  $\text{CH}_4$  Oxidationsreaktion musste der Reaktor vor dem Turbolader in den Abgastrakt des Motors integriert werden. Diese Temperaturen, der dort herrschende Betriebsdruck, die Vibrationen während des Motorbetriebs, erwartete Thermospannungen während Abkühl- und Aufheizphasen, Anforderungen aus der Systemsicherheitsbetrachtung und der beengte Bauraum in einem Maschinenraum stellten die herausfordernden Rahmenbedingungen für das Reaktordesign dar. Das finale Reaktordesign ist in Abb. 5 dargestellt, der Reaktor wird auf einer Tragstruktur auf dem Fundamentrahmen des Motors aufgesetzt.

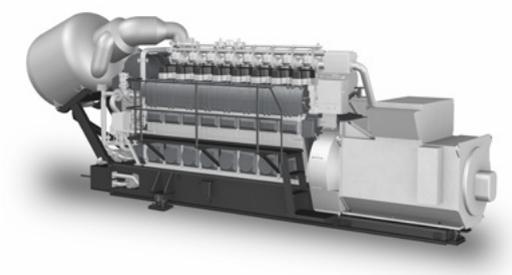


Abb. 5: Modellhafte Darstellung des Versuchsmotors 23/30 DF mit dem Methanoxidationsreaktors auf der linken Seite

Nach Fertigung und Abnahme des Druckbehälters durch eine zertifizierte Stelle konnte der gesamte Aufbau, wie in Abb. 6 dargestellt, am Motorenteststand aufgebaut werden. Insgesamt wurde das System für 267 Stunden betrieben. Nach einer anfänglichen Lern- und Optimierungsphase, in der zahlreiche Motorregelungsfunktionen auf das neue Betriebsverhalten angepasst wurden, konnten folgende Ergebnisse erreicht werden.

#### **Start- und dynamisches Verhalten des Motors:**

Aufgrund der großen zusätzlichen thermischen Masse, die nun vor dem Turbolader am Motor mit vorhanden ist, verzögert sich das Startverhalten im Vergleich zum normalen Motor signifikant. Für den Standard 23/30 DF-Motor ist es möglich, innerhalb von 3 Minuten auf die volle Leistungsfähigkeit hochzufahren, wenn der Motor zuvor ausgeschaltet und nur vorgewärmt ( $\sim 60^\circ\text{C}$ ) ist. Für den IMOKAT-Aufbau ergaben sich jedoch Hochlaufzeiten aus dem vorgewärmten Motorzustand bis auf volle Leistung von 25-30 Minuten. Solange der Reaktor kälter als das Abgas ist, wird letzterem Energie entzogen, welche im Anschluss nicht für die Arbeit des Turboladers zur Verfügung steht und somit die Leistungserhöhung des Motors verzögert. Ist das System jedoch vollständig aufgewärmt, so wurde keine Beeinträchtigung der Motordynamik beobachtet.

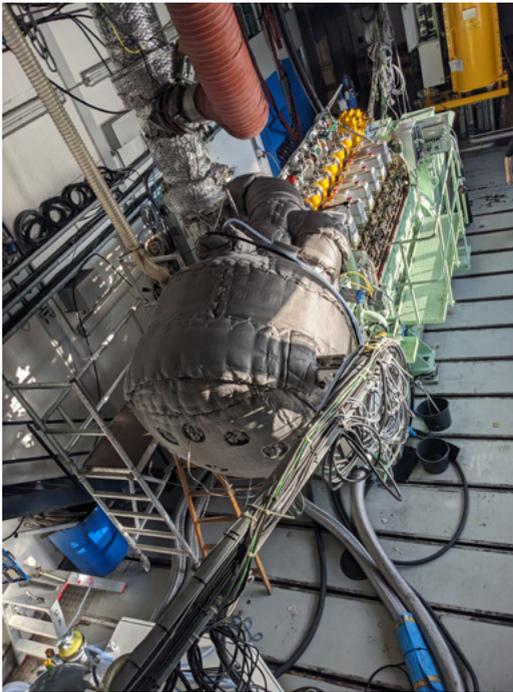


Abb. 6: Aufbau eines 6L 23/30 DF GenSets zusammen mit dem IMOKAT Reaktor zur Methanreduktion (im Vordergrund)

### Umsetzungsverhalten und Stabilität des Katalysators

Wie in nachfolgender Abb. 7 zu sehen, konnte über die bisherige Versuchslaufzeit mehrfach der Umsatz für die Abgaskomponenten Methan  $\text{CH}_4$ , Kohlenmonoxid CO und Formaldehyd  $\text{CH}_2\text{O}$ , bei möglichst gleichbleibenden Reaktionsbedingungen und bei voller Motorleistung vermessen werden.

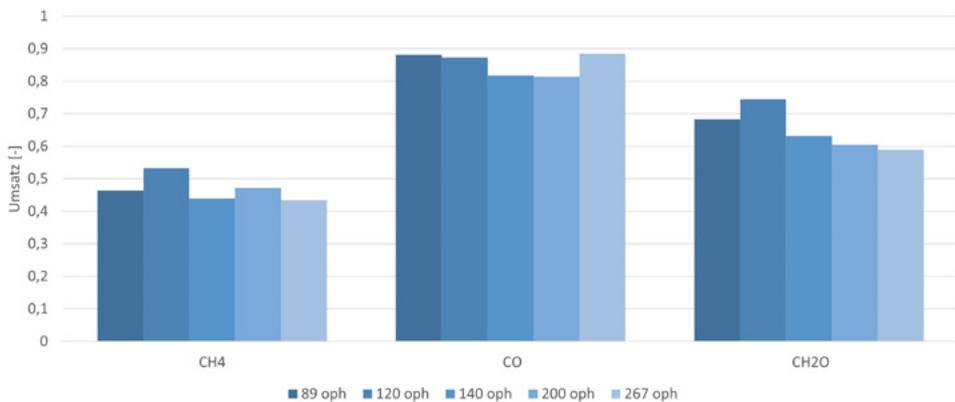


Abb. 7: Umsetzung verschiedene Abgaskomponenten durch den IMOKAT Katalysator im Verlauf der Betriebszeit bei voller Motorleistung

Erkennbar ist, dass die Reduktionsrate allein über den Katalysator für  $\text{CH}_4$  bei ~45% liegt und nahezu stabil bleibt, die Umsatzraten für CO und  $\text{CH}_2\text{O}$  jedoch leicht zurück gehen. Die Stabilität der  $\text{CH}_4$ -Umsetzung ist aber dennoch als großer Erfolg anzusehen. Aktuell am Markt verfügbare, stark edelmetallhaltige Katalysatorsysteme, konnten bisher keine vergleichbare Stabilität aufweisen [9] und es war nicht nötig während der Versuchszeit eine Regeneration durchzuführen. Ebenso wurde lediglich nach 200 Betriebsstunden 20 % des Katalysatormaterial erneuert.

Im Anschluss an den Vollmotorenversuch wurde eine umfängliche Befundung der verwendeten Katalysatoren durchgeführt. Dabei zeigten sich jedoch eine thermische Schädigung der aktiven Katalysatorbeschichtung. Nach ca. 25 % der Katalysatorlänge konnte die Ausbildung einer schwarzen Verfärbung beobachtet werden und Aktivitätsmessungen in dem Bereich zeigten einen deutlichen Rückgang der Katalysatoraktivität in der schwarzen Zone. Vermutlich wurde durch sehr hohe lokale Temperaturen an der Katalysatoroberfläche die aktive Beschichtung zerstört. Aufgrund der hohen freiwerdenden Wärme in der Oxidationsreaktion kann die Präsenz von sehr hohen  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen im Abgas zu einer Selbstbeschleunigung der Reaktion führen. Dabei führt die freiwerdende Oxidationswärme zu einer Erhöhung der Umsatzraten am Katalysator mit der Folge, dass noch mehr Wärme freigesetzt wird und die Temperatur lokal sehr stark weiter ansteigt. Als Konsequenz wird dadurch die maximale Stabilitätstemperatur der Beschichtung überschritten. Vor allem zu Beginn, während der Optimierungsphase der Motorregelungsfunktionen, wurden vereinzelt Systemzustände erreicht, bei denen zwischen Abgas Ein- und Austrittstemperatur des Katalysators eine Temperaturerhöhung von bis zu 200 °C gemessen werden konnte. Da die erste stabile Umsatzmessung erst nach 89 Stunden und damit nach diesen Events stattfand, spiegelt sich diese Deaktivierung des Katalysators nicht in den in Abb. 7 gezeigten Daten wieder. Grundsätzlich sind zum Schutze des Katalysators sehr hohe  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen im Abgas zu vermeiden. Bei den 20 % Katalysatorvolumen, welches nur für die letzten 67 Betriebsstunden im Einsatz war, konnten teilweise gut erhaltene Katalysatoren mit minimalem Aktivitätsverlust befundet werden. In dieser Zeit war das Motorverhalten nahezu frei von Fehlerzuständen und daher weniger katalysatorschädlich. Wo die Belastbarkeitsgrenze an  $\text{CH}_4$  genau liegt, wird Gegenstand des Nachfolgeprojektes RIMOKAT sein.

## **6. Zusammenfassung & Ausblick**

In guter Zusammenarbeit konnte die aus dem Projekt IMOKAT I stammende Katalysatortechnologie weiterentwickelt und dessen Aktivität und Selektivität verbessert werden. Grundlegende wissenschaftlichen Untersuchungen wurden zur genauen Funktion und der Reaktionskinetik des Katalysators durchgeführt. Im Vollmotoren-test konnte eine stabile Methanumsetzung über 267 h beobachtet werden und ein stabiler Betrieb des Systems Motor + Methanoxidationskatalysator erreicht

werden. Jedoch wurden in der abschließenden Befundung thermische Schädigung der Katalysatoren beobachtet.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Projekt IMOKAT II wird mit dem Ende 2024 gestarteten Förderprojekt RIMOKAT, in nahezu gleichbleibender Konsortialkonfiguration, die nächste Stufe der Weiterentwicklung angegangen. Neben einer wesentlich kompakterer Integration am Motor, um Nachteile in der Motordynamik auszugleichen, ist ein weiteres Ziel das Thermomanagement der Katalysatoren zu verbessern.

### **Danksagung**

Das gesamte Konsortium des Verbundvorhabens, bestehend aus MAN Energy Solutions SE, Interkat Catalyst GmbH und dem Lehrstuhl für Technische Chemie I der TU München, dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Verbundvorhabens IMOKAT II sowie dem Projektträger Jülich (PtJ) für die Projektträgerschaft.

## Literaturverzeichnis

[1] Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1805>, aufgerufen im August 2024.

[2] Reducing emissions from the shipping sector, [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector\\_en?prefLang=de](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en?prefLang=de), aufgerufen im August 2024.

[3] 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>, aufgerufen im August 2024

[4] M. Moser, H.-P. Walther, F. Koschany, Methane Slip after Treatment Technologies, Journal of the JIME Vol. 59, No. 3 (2024)

[5] IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844

[6] M. Moser, H.-P. Walther, F. Koschany, D. Jacobsen, MAN Energy Solutions – Technologies to reduce methane slip of dual fuel engines, Paper 141, CIMAC Congress 2023, Busan,

[7] Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, Reducing methane emissions onboard vessels, <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/reducing-methane-emissions-onboard-vessels/>, published 10. October 2022

[8] J. Raab, F. Koschany, A. Döring, C. Watermann, H. Lohmann, S. Kaluza, M. Muhler, O. Hinrichsen, “IMOKAT – Entwicklung eines innovativen Methanoxidationskatalysators zur senkung der Abgas-emissionen von Schiffen im Gasbetrieb”, Statustagung Maritime Technologien, Tagungsband der Statustagung 2019

[9] A. Prospero, S. Hetting, “ METHMARE – EMISSIONEN IN DER SCHIFFFAHRT MIT NEUARTIGEN GASMOTOREN VERRINGERN”, Statustagung Maritime Technologien, Tagungsband der Statustagung 2022



# MVDC4S

## Erforschung von DC-Mittelspannungs-Verteilnetzen zum umweltschonenden Betrieb von Schiffen

### Autorenliste

<b>Dr.-Ing. Roland Weiss</b>	Siemens AG
<b>Manuel Blum</b>	Siemens AG
<b>Oliver Reimann</b>	Siemens Energy
<b>Ingo Rabl</b>	Semikron-Danfoss
<b>Tim Villbusch</b>	AQ-Group
<b>Konstantin Troidl</b>	FhG IISB
<b>Dr.-Ing. Thomas Heckel</b>	FhG IISB
<b>Klaus Brand</b>	MEYER WERFT

---

### 1. Einleitung

Die gesamte Verkehrsbranche – inklusive der Schifffahrtsbranche und dabei insbesondere auch die Kreuzfahrtschifffahrt – steht aufgrund des Klimawandels, der regulatorischen Vorgaben und der kritischen öffentlichen Berichterstattung vor der großen Herausforderung, den Schadstoff- und CO<sub>2</sub> Ausstoß zu reduzieren, lokal emissionsfrei zu fahren und insbesondere auch in Häfen den Ausstoß von Schadstoffen zu minimieren bzw. generell zu vermeiden. Beispielsweise wurde von der Internationalen Seeschifffahrts-Organisation der Vereinten Nationen (IMO) im April 2018 entschieden, dass der CO<sub>2</sub> Ausstoß der internationalen Schifffahrt bis zum Jahr 2050 halbiert werden soll (Bezugsjahr 2008). Für Kreuzfahrtschiffe gibt es weiterhin die Vorgabe der norwegischen Regierung, dass ab 2026 nur noch lokal emissionsfrei fahrende Schiffe in norwegische Fjorde einfahren dürfen.

Diese Ziele können unter anderem durch den vermehrten Einsatz von Batterien (bzw. Batterieelektrischen Schiffen), von Brennstoffzellen, von energieeffizienten Antriebssystemen und von Landstromversorgungssystemen für die Versorgung der Schiffe im Hafen, erreicht werden. Niederspannungs-Gleichstrom-Verteilnetze (LVDC) ermöglichen beispielsweise die einfache Integration von Batterien und Brennstoffzellen auf kleineren Schiffen (wie z. B. Fähren). Weiterhin kann bei konventionell angetriebenen Schiffen die Energieeffizienz durch drehzahlvariable Diesel- oder LNG-Generatoren erhöht werden, da diese insbesondere im Teillastbetrieb in effizienteren Betriebspunkten betrieben werden können.

Die von Siemens-Energy durch die Nutzung von LVDC-Verteilungen (BlueDrive PlusC und BlueDrive Eco) bereits erzielten Vorteile sind in Abb. 1 dargestellt.

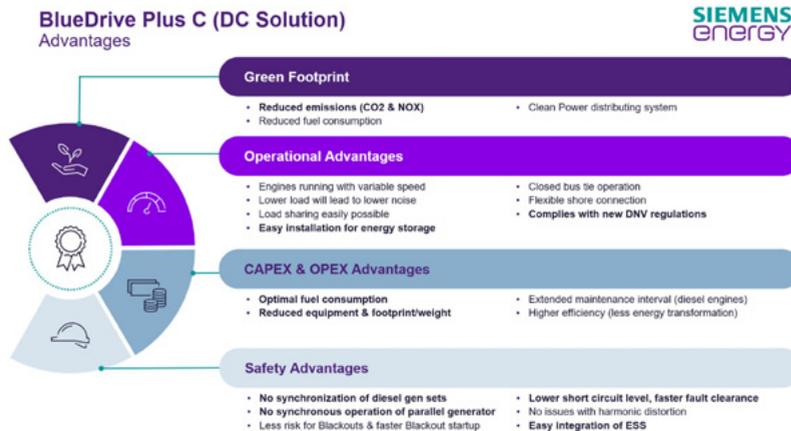


Abb. 1: Übersicht über den Nutzen der LVDC-Verteilung für Schiffe (SISHIP BlueDrive PlusC)

Um diese Vorteile auf größere Schiffe mit hohen Generator-, Antriebs- und Nebenaggregateleistungen, wie z. B. auf Kreuzfahrtschiffen, übertragen zu können, sollten vorteilhafterweise Mittelspannungs-Gleichstrom-Verteilnetze (MVDC) zum Einsatz kommen.

Ein innovativer Ansatz zu einem MVDC-Verteilnetz wird deshalb im Folgenden näher untersucht.

## 2. Systemarchitektur des Mittelspannungsverteilsnetzes

Das in Abb. 2 dargestellte MVDC-Verteilnetz bietet den angeschlossenen Verbrauchern und Quellen volle Flexibilität, da es keine Beschränkung auf eine feste Frequenz gibt. Dadurch können beispielsweise die Quellen/Generatoren auf eine Nennfrequenz optimiert werden, die sich auch von Quelle zu Quelle unterscheiden kann. Dies ist vor allem zum effizienten Betrieb von Wärmekraftmaschinen zur Erzeugung von elektrischer Energie in Kombination mit Energiespeichern von entscheidender Bedeutung. Konkret wird auf diese Weise der Betrieb von Verbrennungsmotoren mit LNG (Liquid Natural Gas) oder E-Fuels, unterstützt, da der Nachteil der mit LNG bzw. E-Fuels betriebenen Verbrennungsmotoren - nämlich ihre geringe Leistungsänderung pro Zeit im Vergleich zu Diesel betriebenen Verbrennungsmotoren - durch den in DC-Netzen sehr einfachen Einsatz von Energiespeichern, wie Batterien und Kondensatoren, effizient kompensiert werden kann. Durch die Verwendung eines MVDC-Verteilnetzes lassen sich auch größere LNG oder E-Fuel basierte Verbrennungsmaschinen drehzahlvariabel betreiben, da die Generatoren über einen Gleichrichter an den DC-Bus angebunden sind.

Dadurch lässt sich auch bei den größeren Aggregaten die Drehzahl an die Effizienzkurve (Muscheldiagramm) der Wärmekraftmaschine anpassen. So ist es möglich im verbrauchsoptimalen Betriebspunkt zu fahren und damit den Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemission ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) zu reduzieren. Darüber hinaus müssen die mit LNG bzw. E-Fuels betriebenen Verbrennungsmotoren nicht für die temporären Lastspitzen ausgelegt werden, da diese von den Energiespeichern zur Verfügung gestellt werden können. Dies wird zu einer Reduktion der Kosten und einer Steigerung des Wirkungsgrades der LNG betriebenen Verbrennungsmotoren führen.

Das MVDC- oder LVDC-Verteilnetz ermöglicht auch eine Landanbindung mit hoher Leistung an einen einfachen MVAC-Landanschluss. Eine innovative Lösung reduziert dabei die erforderliche Blindleistung an der Landanbindungsstelle sowie deren Belastung mit harmonischen der Netzfrequenz.

Eine Landanbindung mit MVDC ist insbesondere bei hohen Ladeleistungen für batterieelektrische Schiffe interessant. Hier können deutlich höhere Leistungen als bei MVAC übertragen werden.

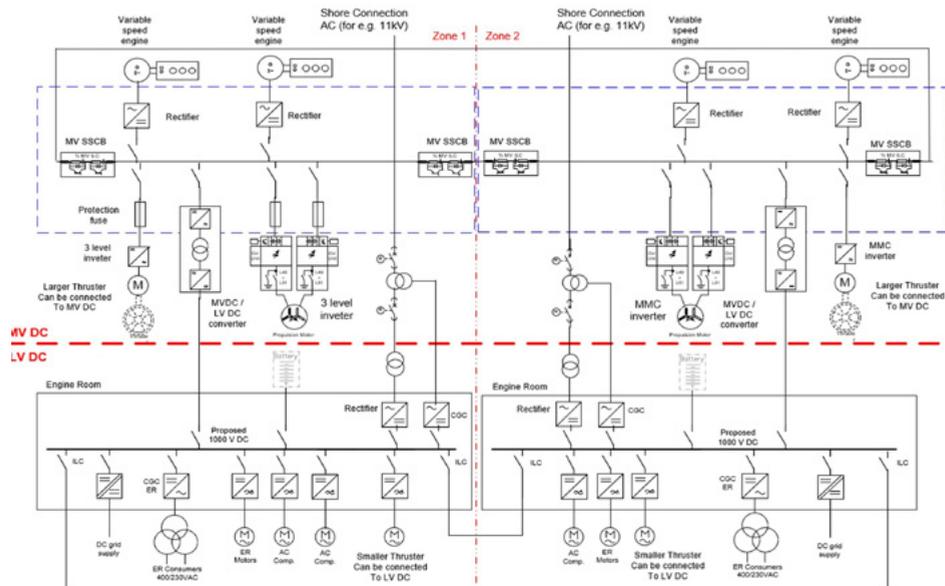


Abb. 2: Innovativer Ansatz zu einem DC-Mittelspannungsverteilstnetz für Schiffe mit bidirektionaler Kopplung zum Niederspannungs-Verteilnetz

Unterhalb des MVDC-Verteilnetzes wird ein LVDC-Verteilnetz vorhanden sein, in welchem die kleineren Verbraucher aus den Hotel- und Maschinenbereichen angeschlossen werden.

Die im LVDC-Verteilnetz vorhandenen Batterien und/oder Brennstoffzellen können auch zum emissionsfreien Betrieb im Hafen, im Fjord oder in anderen Emissionsschutzgebieten, die für den Betrieb des Schiffes notwendige Energie zur Verfügung stellen.

Zur Realisierung vom MVDC-Verteilnetz war die Erforschung von einigen Schlüsselkomponenten, wie z. B. einem Mittelspannungs-Niederspannungsgleichstromwandler mit neuartigem Transformator und neuartigen Halbleitern, sowie von gleichstromfähigen Stromsensoren mit sehr geringer Signalverzögerung für Mittelspannungsanwendungen sowie eines Modulare Multilevel-Konverters notwendig.

### 3. Schlüsselkomponenten für das Mittelspannungsverteilstzes

#### 3.1. Niederspannung-Mittelspannungswandler zur Verbindung der Spannungsebenen

Um möglichst viele Vorteile des im Projekt MVDC4S erforschten MVDC-Systems bei der Verwendung auf Schiffen zu nutzen, braucht es ein Bindeglied zwischen Mittelspannungs- und Niederspannungs-DC-Netzen. Diese Schnittstelle zwischen den Spannungsebenen wird durch einen DCDC-Wandler realisiert. Dieser muss eine bidirektionale, galvanisch getrennte Verbindung zwischen beiden Spannungsebenen realisieren. Konkret bedeutet dies das 6kVDC auf der Mittelspannungs- sowie 700VDC auf der Niederspannungsseite des DCDC-Wandlers anliegen. Aus Skalierbarkeitsgründen wurde eine Systemleistung von 1MW für die Auslegung des DCDC-Wandlers im Projekt MVDC4S festgelegt. Weitere Anforderungen ergeben sich aufgrund der besonderen Einbauposition innerhalb eines Schiffes. Somit wurde besonderes Augenmerk auf Geräuschemissionen, Platzbedarf und Wartungsfreundlichkeit gelegt. Schlussendlich wurde als Wandler-Topologie eine modulare Reihen-/Parallelschaltung mehrerer Dual-Active-Bridge-Modulen gewählt (siehe Abb. 3).

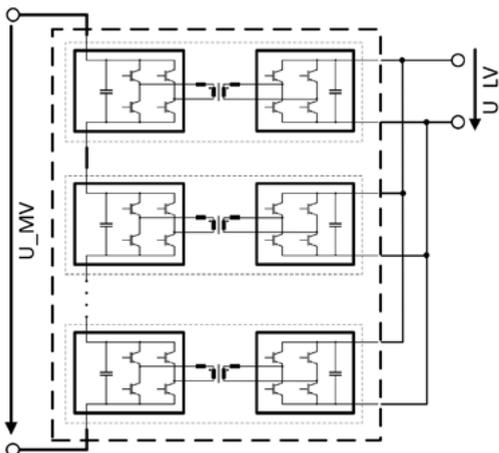


Abb. 3: Wandlertopologie DC//DC

Durch die Wandlertopologie aus Abb. 3 ist es möglich auf Basis von kostengünstigen Niederspannungsbauerelementen den DCDC-Wandler und damit eine Komponente für das MVDC-System aufzubauen.

Zu diesem Zweck wurde eine Modulzahl von acht gewählt, damit ergeben sich mit 750V bzw. 700V ähnliche Zellspannungen für MV- und LV-seitige Zellen und somit ein sehr modularer und gleichteiliger Aufbau der Module, bzw. des Systems.



Abb. 4: Dual-Active-Bridge Wandlermodul

Durch die Wahl der in Reihe geschalteten Module konnten die von Semikron/Danfoss zur Verfügung gestellten 1.2kV IGBT-Module zum Einsatz kommen. Die Anforderung der niedrigen Geräuschemissionen konnte durch eine hohe Schaltfrequenz von 20kHz, die sich an der Grenze der menschlichen Geräuschwahrnehmung befindet, erfüllt werden. Schlüsselkomponente eines Wandlers mit sicherer galvanischer Trennung ist selbstverständlich der eingesetzte Leistungstransformator, welcher von AQ erforscht wurde. Dieser muss eine entsprechend hohe Güte der Isolationsfestigkeit (Teilentladungsfestigkeit, Stoßspannungsprüfungen, etc.), sowie hohe Effizienz, bei gleichzeitig kompakter und gut integrierbarer Bauform (Wasserkühlung) bereitstellen. Weiterhin wurde die für den Betrieb notwendige gut definierte Längsinduktivität als integrierte Streuinduktivität realisiert. Von diesen DAB-Modulen (Abb. 4) wurden acht Einheiten aufgebaut und getestet. Neben dem ordnungsgemäßen und robusten Betriebsverhalten wurden die zuvor berechneten Wirkungsgrade (siehe Abb. 5) durch stichprobenartige Messungen verifiziert. Abb. 5 zeigt ebenfalls einen Ausblick auf erreichbare Wirkungsgrade sofern in zukünftigen Wandlern moderne SiC-MOSFETs als Leistungshalbleiter zum Einsatz kommen. Noch höhere Wirkungsgrade sind ebenfalls durch entsprechend effizientere Halbleiter (mehr Chipfläche, besseres Schaltverhalten) realisierbar. Der Wirkungsgrad kann innerhalb gewisser Grenzen entsprechend der Kundenanforderung „designed“ werden (Kosten vs. Wirkungsgrad).

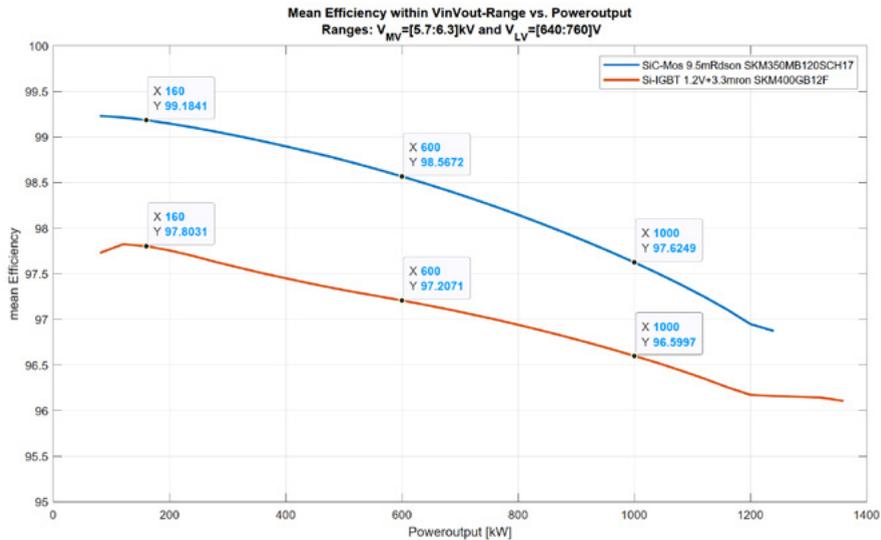


Abb. 5: gemittelte Wirkungsgrade des DCDC-Wandlers innerhalb seines Arbeitsbereichs

Abb. 6 zeigt den finalen Aufbau integriert in ein auf maritime Bedürfnisse angepasstes Schranksystem von Siemens Energy. Der Wandler wurde innerhalb des MV/LV Testsystems getestet. Dabei wurden essenzielle Funktionen, wie zum Beispiel Spannungsstabilisierung bei Lastwechsel-Szenarien, in einer realistischen Testumgebung abgeprüft und untersucht. Bezüglich der Einsparung von Bauraum und Gewicht konnte eine Verbesserung von ca. 30 % gegenüber der klassischen 60Hz-Transformatorlösung demonstriert werden.



Abb. 6:  
 Finaler Aufbau des DCDC-Wandlers  
 innerhalb des Testsystems

### 3.2. Schutzsensoren

Wie z. B. im Artikel mit dem Titel „Neue Perspektiven für Gleichstromnetz-  
Leistungsschalter für Hochstrom-DC-Anwendungen“ in der Zeitschrift Schalt-  
schrankbau erläutert, ist in einem Hochleistung DC-System bei einem Kurz-  
schluss die Anstiegszeit des resultierenden sehr hohen Fehlerstroms aufgrund  
der geringen Induktivität sehr kurz [1]. Entsprechend werden DC-fähige Schutz-  
sensoren mit sehr geringer Signallaufzeit ( $<1\ \mu$  bis 100 ns) benötigt. Ein geeignetes  
Messkonzept für DC-fähige Schutzsensoren stellen damit Hybrid-Sensoren aus  
DC-fähigen Sensoren und schnellen AC-Sensoren mit geeigneter Signalverarbei-  
tung dar. Eine mögliche Realisierung für die Signalverarbeitung wurde z. B. von  
N. Karrer und P. Hofer-Noser beschrieben [2],[3]. Von Siemens würde dazu ein  
Hybridsensor, der aus einem Array von Hallensoren und einer Rogowski-Spule  
besteht, erforscht.



Abb. 7: DC-Schutzsensor mit einer Signal-  
verzögerung kleiner 100 ns

Die Schutzsensoren wurden im Labor und im Systemdemonstrator intensiv  
getestet und bezüglich ihrer Eignung für MVDC-Systeme evaluiert. Dabei erwiesen  
sich die optimierten Schutzsensoren als robust gegen induktive und kapazitive  
Störungen. Die Sensoren liefern ein Stromsignal das konform zur 50 $\Omega$ -Technik  
ist und können aus einer 24 VDC-Versorgung gespeist werden. Der Sensor mit der  
Kennung HCS9 zeigte eine Signalverzögerung kleiner als 100 ns (siehe Abb. 8)

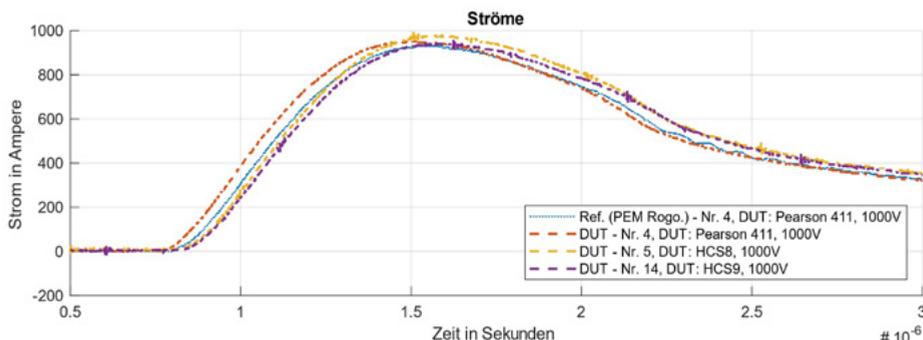


Abb. 8: Verhalten der Schutzsensoren (gelb und lila) bei puls förmigen Strömen relativ zu den reinen  
AC-Referenzsensoren.

### 3.3. Multilevel converter als Antriebsumrichter

Konventionell kommen in Schiffen Dreilevel-Wechselrichter als Antriebsumrichter zum Einsatz. Diese sind jedoch nicht kurzschlussfest und benötigen Ausgangsfilter, um bei ausgangsseitig längeren Leitungen die Motorwicklungen wegen zu hohen Spannungsteilheiten nicht zu beschädigen. Mehrstufige Umrichter, die diese Nachteile nicht haben, wie z.B. Modulare Multilevel Umrichter (MMC) wurden seit ihrer Erfindung in den 1990er Jahren [4], [5] für Energieanwendungen und bidirektionale DC/AC-Spannungswandlung weiter erforscht [6], [7]. MMC-Systeme mit Vollbrückenmodulen spielen eine essenzielle Rolle für die Schutzkonzepte des MVDC-Netzes, da sie beispielsweise Kurzschlüsse im MVDC-Netz besser beherrschbar machen. Am Markt verfügbare MMC-Systeme sind im Allgemeinen für höhere Leistungen über 10 MW entwickelt, benötigen wesentlich mehr Bauraum oder sind insbesondere aus Kostengründen nicht kurzschlussfest realisiert [8]. Ein Ziel innerhalb des Projektes war daher die Erforschung, Auslegung und Realisierung eines für Schiffsanwendungen optimierten MMC-Umrichters mit einem neuen, volumenoptimierten Zell- und Aufbaudesign. Das Ergebnis dieser iterativen volumenoptimierten Zellauslegung zeigt Abb. 9.

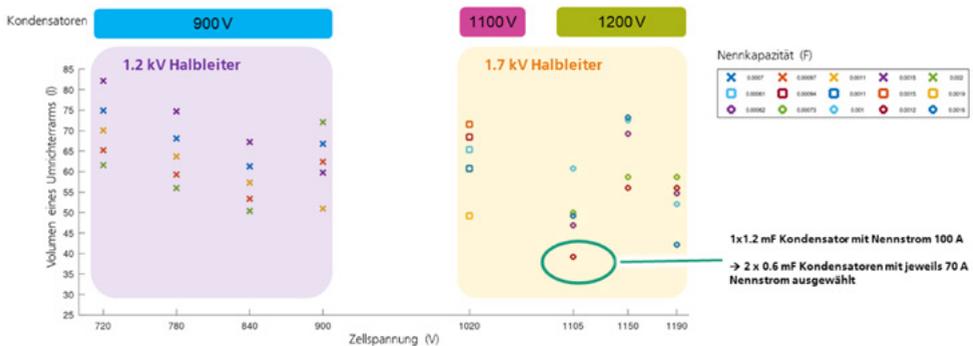


Abb. 9: Iterative volumenoptimierte Zellauslegung für 6kV Schiffsantriebsumrichter mit verschiedenen Parametern: Nennspannung der Zelle, Spannungsklassen der Halbleiter und Kondensatoren, Nennkapazität der Kondensatoren.

Aus der Zellauslegung und den vorgegeben Randbedingungen, wie die eingangsseitige DC-Spannung von max. 6 kV und die ausgangsseitige AC-Spannung von 4,16 kV, ergibt sich die Anzahl der Zellen des Gesamtumrichters. Dieser besteht aus 42 baugleicher Zellen mit einer Gesamtkapazität von 1,2 mF pro Zelle. Diese Vollbrückenzenellen bestehen aus zwei Halbbrückenmodulen vom Typ SEMiX303GB17E4 der Firma Semikron-Danfoss mit einer Sperrspannung von 1,7 kV.

Sowohl die Hard- als auch die Software wurden vollständig vom Projektpartner Fraunhofer IISB entwickelt und erforscht. Beispielsweise zeigt Abb. 10 links eine

Zelle des Umrichters. Die Steuerleiterplatte mit FPGA und die integrierte Strom-/Spannungs-Sensorik (Zell Interface Board, ZIB) ist deutlich in Abb. 10 gut zu erkennen. Die Regelungs- und die Kommunikationssoftware für den MMC-Umrichter wird auf einem Xilinx System-on-Chip Board, welches als Masterunit fungiert, ausgeführt. Die Programmierung der Regelung erfolgte in der Software PLECS und wurde als Embedded Code auf die Masterunit übertragen. Um die elektrischen Signale vom Master zur Steuerplatine ZIB zu übertragen, ist es notwendig die Datenleitungen aufzuteilen und wegen elektrischer Isolation auf Lichtwellenleitersignale umzusetzen.

Für den modularen Multilevelumrichter ist die Isolation nach Vorgabe der Norm DIN EN 61800-5-1: 2017-11 auszuführen. Die Systemspannung für den Gesamtdemonstrator beträgt dabei 5 kV. Es ist die Überspannungskategorie III und der Verschmutzungsgrad 3 anzunehmen. Aus diesen Anforderungen und dem Kühlungskonzept ergibt sich der Aufbau des Gesamtumrichters wie er in Abb. 10 rechts gezeigt ist. Für eine weitere Volumenoptimierung wurden gekoppelte Armdrosseln (500  $\mu$ H pro Arm) verwendet, welche den Platzbedarf im Vergleich zu einzelnen Armdrosseln um ca. 40 % reduzieren.

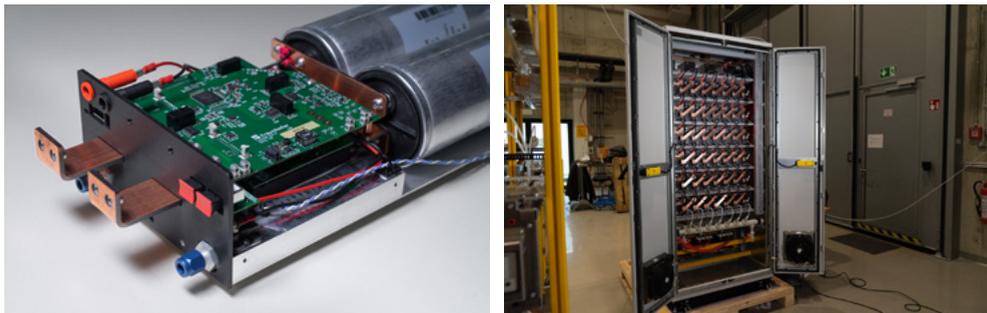


Abb. 10: Links: Vollbrückenzeile mit 1,2 mF Kapazität, 103 Arms Nennstrom, Kühlkörper und Steuerplatine; rechts: MMC mit 42 Zellen, Spannungsmessungen und gekoppelten Arminduktivitäten

Der Umrichter wurde bei 5 kV DC-Eingangsspannung und 5,4 kV Summenspannung der Zellen in den Armen an einer dreiphasigen induktiven Last (1 mH pro Phase) bei vollem Ausgangsstrom (170 Arms) betrieben. Der gemessene Kondensatorspannungshub deckt sich sehr gut mit den Ergebnissen der Auslegung und weist nur eine geringe Abweichung von ca. 3 % auf. Aus dem gemessenen Ausgangsstrom lässt sich ein Wert für THDi von etwa 1,6 % berechnen.

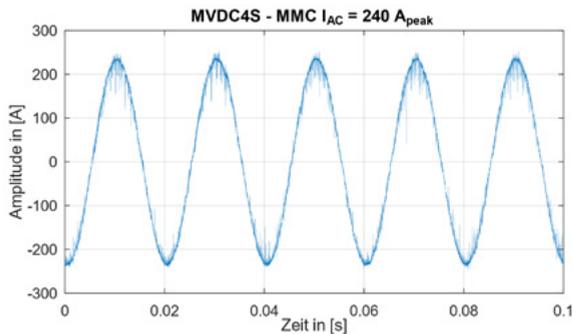


Abb. 11: Messung des Ausgangsstroms einer Phase

#### 4. Aufbau des Demonstrators

Der Gesamtdemonstrator besteht aus den oben beschriebenen, neu entwickelten Komponenten und industriell käuflichen Standardkomponenten. Das verwendete Mittelspannungslabor des Instituts IISB der FhG besitzt zwei Spannungsquellen mit jeweils 800 kW Leistung. Für den Aufbau des Demonstrators werden die AC-Mittelspannungsabgänge der Quellen mit den beiden Mittelspannungsumrichtern von Siemens Energy in einem 40 ft Container verbunden. Die Verbindung zwischen der Einspeisung und dem 20 ft Skid in der Prüfhalle wird über einen DC-Trennschalter hergestellt. Zur Durchführung der Tests mit dem DC/DC Wandler und dem MMC ist ebenfalls eine Niederspannungsbatterie von Siemens Energy mit im 20 ft Skid integriert. Alle Komponenten werden von einer zentralen Kühlanlage mit DI-Wasser versorgt. Die Überwachung und Steuerung der Komponenten des 40 ft Containers wird durch eine von Siemens Energy entwickelte Software sichergestellt. Diese ermöglicht es auch verschiedene Lastszenarien für das MVDC-Netz nachzustellen.

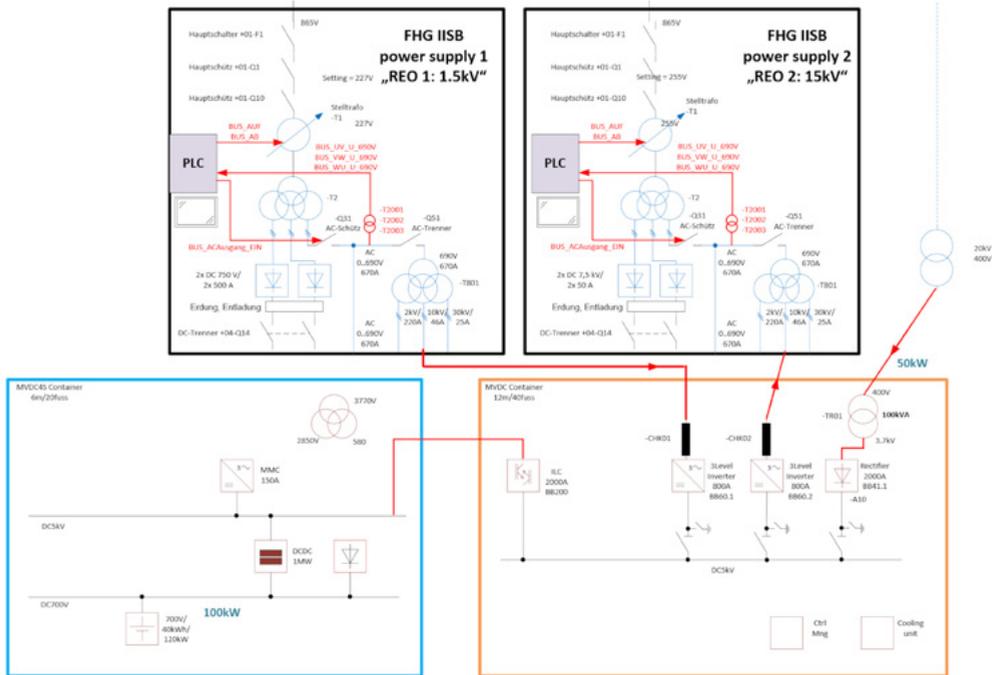


Abb. 12: Übersicht MVDC4S Testaufbau



Abb. 13: Das Bild zeigt den 40 ft Container mit dem Gleichrichter, Drei-Level-Antriebsumrichter, einem Halbleiter-Leistungsschalter und einer Kühleinheit vor dem Mittelspannungslabor des Instituts IISB der FhG (MV DC grid for ships test setups for Siemens Energy at Fraunhofer IISB medium voltage lab, Erlangen)



Abb. 14:

Das Bild zeigt das 20 ft Skid (rechts) mit dem DC/DC-Wandler, dem MMC und einer Batterieeinheit im Mittelspannungslabor des Fraunhofer IISB (MV DC grid for ships test setups for Siemens Energy at Fraunhofer IISB medium voltage lab, Erlangen)

## 5. Evaluierung des Mittelspannungsverteilnetzes

Für die Evaluierung des MVDC-Verteilnetzes wurden die Auswirkungen auf Bauraum, Gewicht und die Energieeffizienz von einem Kreuzfahrtschiff mit ca. 60.000 GT betrachtet. Dabei wurde eine Installation von einem MVDC- und einem LVDC-Verteilnetz angenommen. Eine Installation von Batterien und Brennstoffzellen wurde nicht berücksichtigt.

Bei der Betrachtung vom Bauraum lässt sich eine Einsparung von ca. 50 % in den entsprechenden technischen Bereichen zu elektronischen Energieverteilung, im Vergleich zu einem herkömmlichen Schiff mit AC-Verteilnetzen feststellen. Diese Einsparungen sind hauptsächlich auf das transformatorlose Design zurückzuführen. Die Bauraumeinsparung in den elektrischen Hauptverteilungen des Hotelbereichs würde den Einbau von zusätzlichen Innenkabinen ermöglichen. Auch bei der Betrachtung vom Gewicht für die Hauptkomponenten der elektrischen Energie-Verteilung lässt sich eine Einsparung von ca. 30 % feststellen. Allerdings ist die Gewichtseinsparung nicht signifikant im Vergleich zum Gesamtgewicht des Schiffes.

Für die Evaluierung der Energieeffizienz eines MVDC-Verteilsystems wurde der Brennstoffverbrauch von einem Schiffsantrieb mit 4 Dieselmotoren beim Betrieb mit konstanter Drehzahl (AC-Variante) bzw. variabler Drehzahl (DC-Variante) simuliert. Dabei wurden die Antriebs- und Hotellasten von einem Kreuzfahrtschiff und der spezifische Brennstoffverbrauch von Schiffsmotoren hinterlegt. Im Ergebnis sind auf einer durchschnittlichen Kreuzfahrt bei der DC-Variante Einsparungen von ca. 2,5 % des Brennstoffes möglich.

Weiterhin wurde der Wirkungsgrad wesentlicher Komponenten bei unterschiedlichen Betriebszuständen für die Bewertung der Energieeffizienz abgeschätzt.

Dabei wurde die statistische Verteilung der Betriebszustände aus Betriebsdaten verschiedener Kreuzfahrtschiffe ermittelt. Tab.1 zeigt den Vergleich zwischen einem MVAC- und eine MVDC-System:

Tab. 1: Effizienzvergleich MVAC und MVDC

	Zeit	Genset	Verluste AC	Verluste DC	Delta DC zu AC	Einsparung
DP Betrieb/ Manöver	7 %	12500 kW	1501 kW	878 kW	-623 kW	-0,5 %
Hafenbetrieb	28 %	8000 kW	548 kW	515 kW	-33 kW	-0,4 %
Transferfahrt/ Kreuzfahrt	65 %	34500 kW	4434 kW	3430 kW	-1004 kW	-2,9 %
Mittelwerte	100 %	25540 kW	3141 kW	2435 kW	-705 kW	-2,8 %

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Evaluierung des MVDC-Verteilnetzes auf Basis von Berechnungen, Simulationen und Messungen am Demonstrator und den Einzelkomponenten zeigten sich insgesamt folgende Vorteile:

- Eine Einsparung beim Bauraum (ca. 50 % in den entsprechenden technischen Bereichen der elektrischen Energieverteilung) ermöglicht die Installation von zusätzlichen Kabinen auf dem Schiff, welche die Rentabilität erhöhen können.
- Für DC-Verteilnetze bieten sich aus technischen Gründen Netzstrukturen an, welche als Nebeneffekt gleichzeitig die Systemverfügbarkeit erhöhen.
- Durch die in DC-Systemen sehr schnelle Klärung von Kurzschlüssen und der sehr schnellen Wiederherstellung des Betriebszustandes (kein Zeitverlust durch die Synchronisierung der Generatoren) wird eine Erhöhung der Fehlertoleranz ermöglicht.
- Eine aktive Steuerung des Energieflusses zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen ist auf Basis unserer theoretischen und experimentellen Ergebnisse mit einem DC/DC-Wandler auf wirtschaftliche Weise möglich. Dadurch können viele der Komponenten in der Energieverteilung anders/kleiner ausgelegt werden.
- Durch den lautlosen Betrieb des DC/DC-Wandlers kann der Aufwand für die Schallisolierung reduziert werden.

- Mit einer tieferen DC-Integration auf der Niederspannungsseite insbesondere im Hotelbereich sind weitere Einsparungen im Platz, Gewicht und beim Brennstoffverbrauch zu erwarten.
- Eine Synchronisierung der Generatoren ist nicht mehr notwendig, dadurch ist ein schnelleres Zuschalten möglich. Auch fällt damit eine vergleichsweise häufige Ursache für Fehler bei der elektrischen Energieversorgung weg.
- Der Einsatz von drehzahlvariabler Generatorsets in DC-Systemen (dies haben in DC-Systemen ein bessere Kostenposition) ermöglicht eine Erhöhung der Wartungsintervalle der Verbrennungsmotoren (Diesel, LNG, Methanol, usw.) und damit als Sekundäreffekt eine Reduktion der Wartungskosten.
- Durch Wegfall der 50/60Hz Konvertierung wird der Landanschluss insbesondere auf der Landseite kostengünstiger und technisch einfacher. Dies kann zukünftig zu einer größeren Anzahl von Landanschlüssen und deren vermehrter Nutzung führen. Langfristig können so auch batterieelektrische Schiffe mit hoher Leistung durch DC-Schnellladen mit Energie versorgt werden.
- Ein bisheriger Betrieb der Querstrahlruder mit Verstellpropellern und DOL-Antrieb wird bei DC in einen Umrichterbetrieb mit Fixpropeller geändert, wodurch die Hydraulikanlage entfällt.
- Bei der Anwendung eines DC-Verteilnetzes mit einer ESS-Unterstützung ergeben sich zusätzliche Vorteile:
  - Peak Shaving und Load Leveling zum optimierten Betrieb der Generatorsets im effizientem Lastprofil.
  - Temporärer “Null-Emissionsbetrieb” beim Einlauf in den Hafen und während der Hafentiegezeit.
  - Vermeidung eines Blackouts während der Hafentiegezeit und eines möglichen Shut-downs des Generatorsets.
  - Vermeidung eines Blackouts während der Umstellung auf den Landanschluss.
  - Unterstützung der mit LNG betriebenen Generatorensets im Manövrierbetrieb und während des Standby-Starts.
  - Regelreserve für sprunghafte Lasten wie z. B. Querstrahlruder

## Literaturverzeichnis

- [1] ABB Stotz-Kontakt GmbH „Neue Perspektiven für Gleichstromnetze- Leistungsschalter für Hochstrom-DC-Anwendungen“ im Schaltschrankbaumagazin vom 16. Jun 2024  
<https://schaltschrankbaumagazin.de/env/neue-perspektiven-fuer-gleichstromnetze/>
- [2] N. Karrer und P. Hofer-Noser, „A new current measuring principle for power electronic applications“, S. 279–282, 1999. doi: 10.1109/ISPSD.1999.764117 (siehe S. 31, 33, 52–54).
- [3] N. Karrer, P. Hofer-Noser und D. Henrard, „HOKA: a new isolated current measuring principle and its features“, in Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370), IEEE, 1999,S. 2121–2128. doi: 10.1109/IAS.1999.806028 (siehe S. 31, 52)
- [4] J. Kolb, F. Kammerer, M. Gommeringer and M. Braun, „Cascaded Control System of the Modular Multi-level Converter for Feeding Variable-Speed Drives,“ in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 1, pp. 349-357, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2299894.
- [5] B. Ruccius, T. Kraus, R. Westermann, T. Heckel, M. März and B. Wagner, „A Cascaded Control Concept for Modular Multilevel Converters with Capacitor Voltage Estimation using a Kalman Filter,“ 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, Korea (South), 2019, pp. 1198-1204, doi: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8796897.
- [6] J. Kolb, F. Kammerer, M. Gommeringer and M. Braun, „Cascaded Control System of the Modular Multi-level Converter for Feeding Variable-Speed Drives,“ in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 1, pp. 349-357, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2299894.
- [7] B. Ruccius, T. Kraus, R. Westermann, T. Heckel, M. März and B. Wagner, „A Cascaded Control Concept for Modular Multilevel Converters with Capacitor Voltage Estimation using a Kalman Filter,“ 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), Busan, Korea (South), 2019, pp. 1198-1204, doi: 10.23919/ICPE2019-ECCEAsia42246.2019.8796897.
- [8] Siemens Energy Global GmbH & Co. KG Erlangen, Germany, 2022 No. PT50-T10004-00-76DE  
[https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/87cdd3cd-be98-4a79-b9c3-b03b00d3e37a/2022-03-11-HVDC-PLUS-pdf\\_Original%20file.pdf](https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/87cdd3cd-be98-4a79-b9c3-b03b00d3e37a/2022-03-11-HVDC-PLUS-pdf_Original%20file.pdf)



# Charisma

## Cyber-physische Antriebsmodule für maritime Anwendungen

### Autorenliste

M.Sc. Marius Köder

Advanced Mechatronics GmbH

B.Eng. Markus Hiller

Hochschule Aalen

M.Sc. Tobias Winter

Advanced Mechatronics GmbH

Prof. Dr. rer. nat Markus Glaser

Hochschule Aalen

---

### 1. Einleitung

Das Forschungsprojekt CHARISMA erforscht und entwickelt im Bereich der cyber-physischen Antriebsmodule, die im Vergleich zu den hydraulischen Systemen deutliche Vorteile mit sich bringen. Abbildung 9 zeigt ein derartiges System eines Aktuators. Durch die Vorteile aus dem Stand der Technik ergeben sich die folgenden Forschungsschwerpunkte und die daraus abgeleiteten Ziele des Forschungsprojektes:

- Erforschung eines geeigneten Prognostics and Health Management (PHM) Konzepts zur Steigerung der Verfügbarkeit der Module.
- Erforschung und Entwicklung von geeigneten Motor-, Sensor- und Elektronikmodulen, die in den extremen Umweltbedingungen der Meerestechnik eine sehr hohe Zuverlässigkeit aufweisen (25 Jahre wartungsfreier Betrieb).
- Erforschung und Einsatz von neuartigen Materialien für die maritime Anwendung, um die Zuverlässigkeit zu steigern und die Kosten zu senken.
- Integration von Industrie 4.0 kompatiblen Schnittstellen und Protokollen, um der Anwendung Echtzeitdaten zur Verfügung zu stellen (z. B. OPC-UA und PROFINET).
- Die Module sollen in unterschiedlichsten Systemarchitekturen (zentrale/dezentrale Applikation) eingesetzt werden können.
- Entwicklung von fehlertoleranten Kleinspannungsmotoren mit bis zu 400 W sowie hohem Drehmoment und weitem Feldschwäcbereich.

- Erforschung und Entwicklung einer neuartigen Sensortechnik zur zuverlässigen Erfassung aller relevanten physikalischen Größen.
- Integration der Module in einen Linearaktuator.
- Validierung des Linearaktuators, um die Zielerreichung zu demonstrieren.

Intelligente, hochintegrierte, digitalen und mechatronischen Antriebsmodule gewinnen in vielen Bereichen der Meerestechnik an Relevanz. Diese, auch als cyber-physische Systeme in der Meerestechnik eingesetzten Systeme sind meist hydraulisch [1] und kommen beispielsweise in der Meerwasserentsalzung, Carbon Capture and Storage, der Offshore Energieerzeugung, und bei autonomen und ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen.

Alle bekannten Aktuatoren [15], [18] und [20] bestehen aus Getriebe, Motor und integrierter Elektronik die zum Teil durch integrierte Batterien [15], [20] erweitert sind. Sie werden über im Wasser steckbare Verbindungen an die Energieversorgung angeschlossen und sind einkanalig ausgeführt [18]. Alle bekannten Linearaktuatoren [8], [22] und [23] erreichen nur eine geringe Kraft von bis zu 11 kN und sind mit den traditionellen Schnittstellen RS485, Digital IO oder mit Analogsignalen ausgerüstet. Des Weiteren steht auch ein Condition Monitoring nicht zur Verfügung. Die Aktuatoren erfüllen nicht die Anforderungen an die Zuverlässigkeit und sind daher für den Einsatz in hochverfügbaren Unterwasser Systemen nicht geeignet. Zur Sicherstellung der Position im stromlosen Zustand werden optional dezidierte Bremsen integriert, welche auch einen negativen Einfluss auf die Verfügbarkeit haben. Die Positionserfassung erfolgt entweder HALL Elementen oder industriellen Resolver.

## **2. Methodik**

Im Bereich der hochzuverlässigen Motoren für Luftfahrtanwendungen werden verschiedene Ansätze für ein fehlertolerantes Design und ihre Auswirkung auf das System untersucht [2], [3]. Dabei werden mehrkanalige wie auch hochphasige Maschinen untersucht. Diese Ansätze werden hinsichtlich des Einsatzes in der Meerestechnik genauer analysiert und optimiert. Die Lebensdauer der Wicklungsmaterialien wird signifikant von den Betriebsparametern beeinflusst [5]. Für die besonderen Betriebsbedingungen im Bereich der Meerestechnik sind noch keine Ergebnisse verfügbar. Lagerschäden an Elektromotoren können mittels performanter Motorstromanalysen diagnostiziert werden [16]. Dies stellt für dieses Projekt einen Ansatz dar, um Unterwasserventile zu diagnostizieren.

Besonders im Bereich der Luftfahrt wird an PHM zur Senkung der Wartungskosten geforscht [6], [11]. Studien identifizieren großes Potential für Kosteneinsparungen im Einsatz des PHM bei Tiefsee Anwendungen [7]. Mit dem Einsatz sind allerdings Kosten und Risiken verbunden. Besondere Bedeutung hat die Zuverlässigkeit des PHM im Tiefseeinsatz, verursacht durch die hohen Kosten einer Wartung. Daher soll für dieses Projekt eine besonders robuste Sensorik erforscht und entwickelt werden. Nachdem die „funktionale Sicherheit“ mit der Normung IEC 61508 (erst seit 1998 verfügbar) bisher nur für bestimmte sicherheitskritische Anwendungen eingesetzt wird, wird erwartet, dass nach dem Vorreiter Norwegen weitere Staaten und Regulierungseinrichtungen für den Offshore Öl und Gas nachziehen werden. Ziel ist eine klar definierte Sicherheit bzw. Sicherheitsfunktionen und Regelwerk für Entwicklung und Einsatz.

Digital Twins können während des gesamten Produktlebenszyklus von komplexen Systemen eingesetzt werden. Damit ist es auch möglich, während des Entwicklungslebenszyklus unvorhergesehene Wechselwirkungen zwischen den Komponenten zu reduzieren [9]. In einem Digital Twin können auch die Zuverlässigkeitsmodelle mit den Daten des Condition Monitorings kombiniert werden, um so eine bessere Aussage über den Degradationsgrad des Systems zu treffen [12]. Bayessche Netzwerke kommen zum Einsatz, um aktuelle Sensordaten und Erfahrungswerte in das Modell zu integrieren [12] und [13]. Ein weiterer Ansatz ist es, die Bayessche Netzwerke in ein Digital Twins zu integrieren [17].

Maschinelle Lernverfahren werden eingesetzt, um eine präzise Schätzung des aktuellen und zukünftigen Zustands des Systems auf Basis von Sensorwerten zu ermöglichen [14]. Dabei werden unterschiedliche Vorhersagemethoden (Zuverlässigkeits-, Modell- und auf Daten basierende Methode) an einem Piezoantrieb verifiziert. Für die Modellierung der Zuverlässigkeit von elektronischen Baugruppen wird die PoF (Physics of Failure) Methodik in Kombination mit PHM genannt [24], [25]. Zur Verlässlichkeitssteigerung von mechatronischen Systemen wird auch eine selbstoptimierende autonome Betriebsstrategie auf Basis einer erweiterten Zustandsüberwachung befürwortet [21].

Das Forschungsprojekt CHARISMA teilt sich in die folgenden fünf Module auf, die von den einzelnen Projektteilnehmern in interaktiven Teilprojekten bearbeitet werden. Die drei Phasen mit den einzelnen Modulen des Forschungsprojektes werden entsprechend Abbildung 1 bearbeitet.

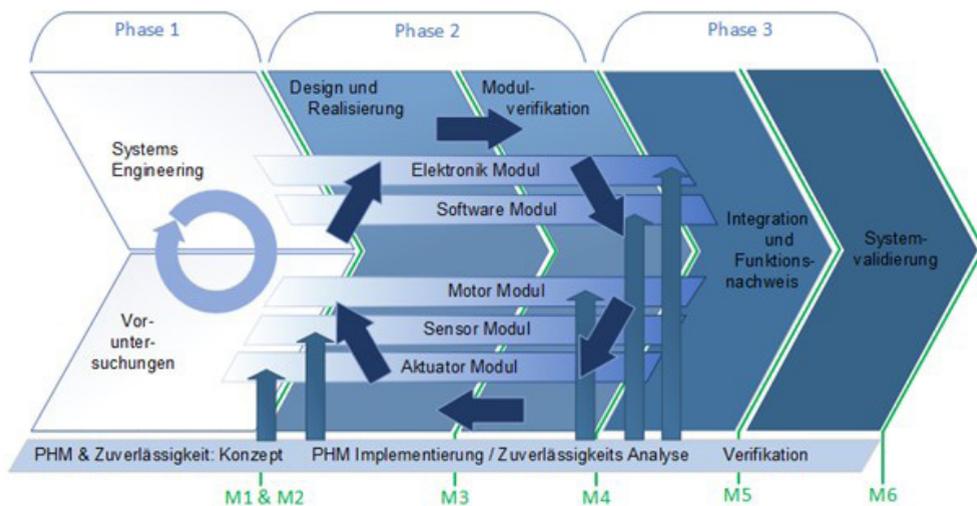


Abb. 1: Projektplan von CHARISMA

Die Einzelkomponenten sollen dabei so gestaltet werden, dass diese unabhängig voneinander flexibel in unterschiedliche Applikationen und Systeme integriert werden können. Die Sensor- und Elektronikmodule können in ROVs (Remotely Operated Vehicle), AUVs (Autonomous Underwater Vehicle), Tiefseeproduktionsanlagen, Deep-Sea Mining sowie autonomen Plattformen eingesetzt werden. Der übergeordnete Lösungsansatz besteht aus der Erforschung und Entwicklung von cyber-physischen Antriebsmodulen, die flexibel in unterschiedliche Zielsysteme integriert werden können. Damit können kompakte, zuverlässige und kostengünstige Antriebssysteme realisiert werden. Die Aktuatoren können dabei direkt auf dem Ventil montiert und über Leitungen an die Elektronik angeschlossen werden. Die Module können darüber hinaus auch in einem System gemeinsam mit Ventilen und Pumpen integriert werden. Auf der Basis des Stands der Wissenschaft wird ein PHM für mechatronische Antriebssysteme in der Meerestechnik erforscht. Die umfangreiche Sensorik und die Ergebnisse aus der Erforschung des Langzeit- und Degradationsverhaltens der eingesetzten Materialien werden im PHM Konzept integriert.

- Das Elektronik-Modul soll den Betrieb von Motoren in bis zu 300 m Entfernung ermöglichen. Um eine Störung der Signalleitungen zu minimieren, sollen hohe Frequenzen im Ausgangsspektrum reduziert werden. Hierzu ist geplant dU/dt Filter zu entwickeln. Zur Sicherstellung der Langlebigkeit des Designs muss für jedes Bauteil ein Ersatzbauteil zur Verfügung stehen. Durch modernsten Aufbau und Verbindungstechnik soll der Bauraumbedarf minimiert werden. Für das PHM werden entsprechende Schaltungen zur Diagnose entwickelt.

- Ein wesentlicher Bestandteil der Software ist die Integration der Industrie 4.0 Kommunikationsschnittstellen. Die Protokolle (PROFINet und OPC-UA) sollen aus Zuverlässigkeits- und Wartbarkeitsgründen hardwareunabhängig implementiert werden. Auf Basis der Erkenntnisse aus der Erforschung des Degradationsverhaltens sowie den Sensorwerten soll ein PHM Implementierungskonzept entwickelt und in die Software integriert werden. Damit soll eine Aussage zu dem State of Health der Module getroffen werden können.
- Für die Erstellung der Wicklungspakete soll ein spezieller widerstandsfähiger Kupferlackdraht zum Einsatz kommen. Der Draht soll in einem Versuchsaufbau hinsichtlich seines Degradationsverhaltens in Abhängigkeit der relevanten Parameter charakterisiert werden. Der Stator soll mit einer intelligenten Fehlertoleranz sowie einem hohen Rastmoment ausgeführt werden. Eine geeignete Nutgeometrie wird mit Hilfe der FEM entwickelt. Die Magnete sollen im Rotor vergraben werden.
- Für die Erfassung von Luftfeuchtigkeit, Beschleunigungen, Orientierung und Druck werden für die Umgebungsbedingungen geeignete hochintegrierte Sensoren evaluiert und im Sensormodul integriert. Erste interne Voruntersuchungen zeigen, dass im Öl gelöste Wassertröpfchen z. B. durch zwei räumlich naheliegende Elektroden detektiert werden können. Das Sensorprinzip soll detailliert erforscht und charakterisiert werden. Es besteht eine hohe Abhängigkeit von Spannung, Temperatur, Betriebszustand des Motors und des Drucks.

### **3. Ergebnisse**

Im Folgenden werden Ergebnisse aus zwei (Sensor und Aktuator) der insgesamt fünf Module präsentiert, die im Rahmen des Forschungsprojektes bearbeitet wurden. Zudem wird der zur Verifikation der Module entwickelte Umweltsimulator vorgestellt.

#### **Sensor Modul**

Die Messreihen zur Detektierbarkeit von Salzwasser in Öl zeigen auf, dass mit dem optimierten Sensorprinzip basierend auf zwei Kupferbahnen (siehe Abbildung 3), die mit einer Gleichspannung beaufschlagt sind eine akkurate Erkennung von Salzwasser im Öl sichergestellt werden kann. Voruntersuchungen mit anderen Abbildung 2 Leiterplattenanordnungen sowie mit Wechselspannungen führten zu ungenaueren Ergebnissen und schnellerem Verschleiß der Sensoren.

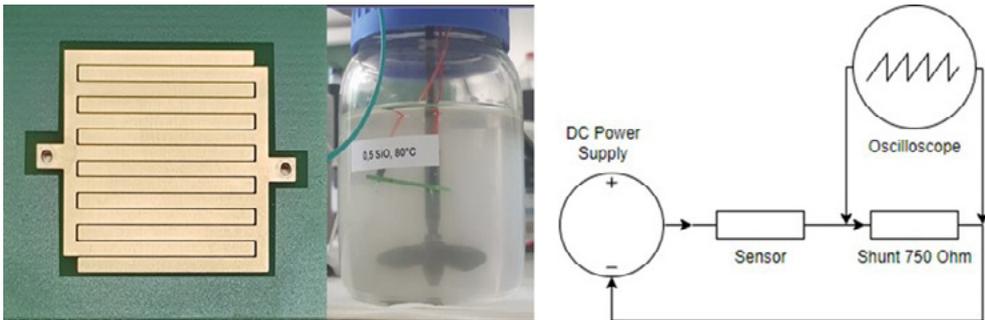


Abb. 2: Sensor PCB, Testaufbau und Ersatzschaltbild vom Versuch

Wird, wie in Abbildung 3 gezeigt ein Gleichspannungssignal auf den Sensor gegeben, so kann das resultierende Signal dafür genutzt werden, Salzwasser, dass eine elektrische Verbindung zwischen den beiden Leiterplatten erzeugt, zu erkennen, indem man eine Spannungsänderung am Messsignal detektiert.

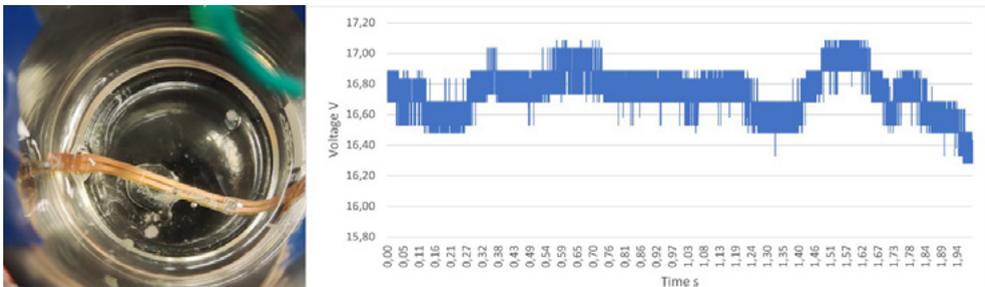


Abb. 3: Optimierter Sensor und Messdaten-Ausschnitt

Über verschiedene Messreihen hinweg haben sich dann die in Abbildung 4 dargestellten Messgenauigkeiten ergeben. Basierend auf den Ergebnissen kann darauf geschlossen werden, dass Salzwasser im öl-gefüllten System mit großer Wahrscheinlichkeit detektiert werden kann. Damit ist der Sensor ein Indikator für die Dichtigkeit des jeweiligen Systems und es können frühzeitig Wartungsarbeiten geplant werden.

### Aktuator Modul

Der vorab in der Simulation (Abbildung 5) erprobte Maximum Torque per Current (MTPC) und Feldschwähebtrieb eines permanenterregtem Synchronmotors (PMSM) konnte in einem Versuchsaufbau (Abbildung 6) nachgestellt werden. Die Versuchsergebnisse in Abbildung 7 zeigen, wie bereits in den Simulationsergebnissen aufgezeigt, eine deutliche Steigerung des Drehmoments des Motors im Vergleich zum Betrieb ohne MTPC und/oder Feldschwäche.

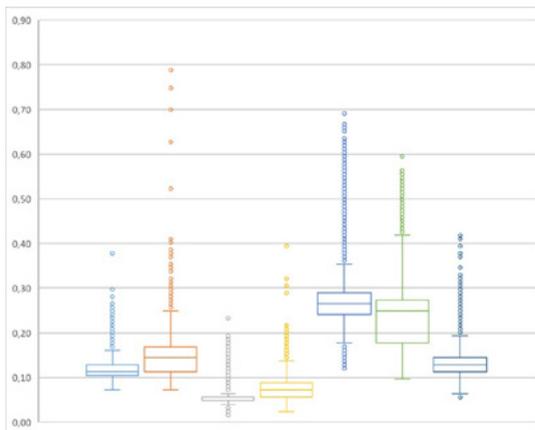


Abb. 4:  
Messdatensteuerung verschiedener Messreihen von mit Salzwasser verunreinigtem Öl

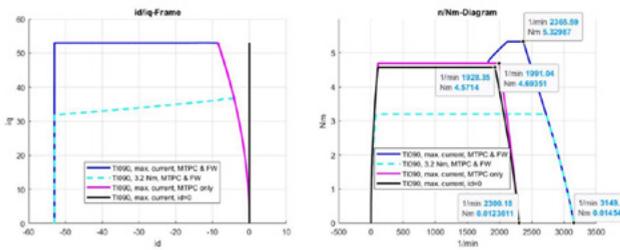


Abb. 5:  
Simulationsergebnisse für id und iq sowie dem resultierenden Drehzahl-Drehmoment Kennfeld

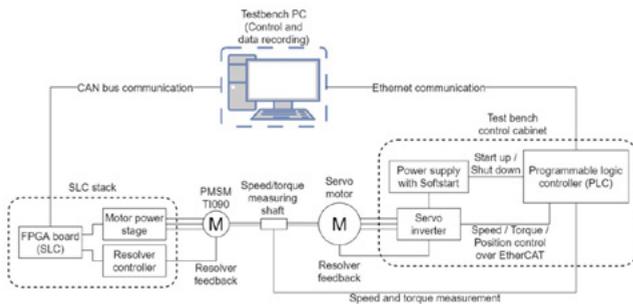


Abb. 6:  
Versuchsaufbau zu Validierung der Simulationsergebnisse

Während das aktivierte MTPC alleine nur eine geringe Steigerung des Drehmoments über den gesamten Geschwindigkeitsbereich des Motors erwirkt, wird das Drehmoment bei eingeschaltetem Feldschwäche-Betrieb ab einer Geschwindigkeit von 500 Umdrehungen pro Minute deutlich erhöht. Die gleichzeitige Aktivierung von MTPC und Feldschwäche-Betrieb steigert die Motorperformance auch bereits im unteren Drehzahlbereich des Motors.

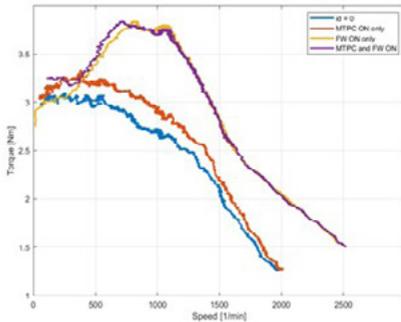


Abb. 7: Realmessdaten mit und ohne MTPC sowie Feldschwäche (FW)

Die Einzelmodule wie z. B. der vorab gezeigte Salzwassersensor und die Feldschwächeregelung von Motoren können in Gesamtsystemen wie beispielweise dem in Abbildung 9 gezeigten vollelektrischen und mit Öl gefüllten Aktuator eingesetzt werden um umso dessen Zuverlässigkeit, Diagnostizierbarkeit und Leistungswerte zu steigern.

### Umweltsimulation

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein Umweltsimulator entwickelt und aufgebaut, mithilfe dessen unter anderem Langzeittests für Systeme unter realen Umgebungsbedingungen durchgeführt wurden und noch durchgeführt werden. Der Gesamtaufbau des Umweltsimulators ist in Abbildung 8 abgebildet. Der thermisch isolierte Drucktank kann mithilfe der Druckerzeuger-Einheit Drücke bis 330 bar abbilden, was einer Meerestiefe von ca. 3300 m entspricht. Durch integrierte Heiz- und Kühlfunktionen können sowohl realitätsnahe Umgebungstemperaturen von 4°C als auch deutlich erhöhte Temperaturen erzeugt werden, um damit beschleunigte Lebensdauertests zu realisieren.



Abb. 8: Umweltsimulator bestehend aus Drucktank mit Heiz-/Kühlfunktion

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Digitalisierung von maritimen Systemen führt zu einer gleichzeitigen signifikanten Steigerung von Sicherheit und Zuverlässigkeit [10] und stellt so eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik dar. Die umfangreiche Sensorik und die Ergebnisse aus der Erforschung des Langzeit- und Degradationsverhaltens können in einem modellbasierten Ansatz weiterverfolgt werden, der in zukünftigen Projekten in einen digitalen Zwilling weiterentwickelt werden kann. Dies führt zu einer signifikanten Steigerung der Zuverlässigkeit und Produktivität, einem emissionsfreien Betrieb sowie der Reduktion des Ressourceneinsatzes, der Kosten und der CO<sub>2</sub> Emissionen.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt zeigen, dass hochintegrierte Systeme in einem vollelektrischen Aktuator mittels geeigneter Software interagieren können, die über einen FPGA gesteuert wird. Es könnte sowohl der Motorbetrieb im Feldschwähebereich geregelt werden als auch Sensorik entwickelt werden, die Meerwasser im System detektieren kann.



Abb. 9: Vollelektrische Tiefsee-Aktuator von Advanced Mechatronics

Langzeittests im Umweltsimulator zeigen, dass die Einzelmodule für einen wartungsfreien Betrieb über 25 Jahre unter den herausfordernden Bedingungen in der Tiefsee betrieben werden können und das implementierte PHM-Konzept und die damit verbundene Fehlererkennung ermöglichen die frühzeitige Detektion von degradationsbedingten Ausfällen.

Die Integration der einzelnen Module in ein Lineartriebssystem konnte erfolgreich durchgeführt und validiert werden.

Im Hinblick auf darauf aufbauende Forschungs- und Entwicklungsthemen wird nun versucht, die Einzelmodule in Großanlagen der Tiefsee-Meerwasserentsalzung zu verknüpfen und somit große Applikationen in der Tiefsee auf die kommenden Herausforderungen und die Thematik der Digitalisierung vorzubereiten.

## Danksagung

Wir bedanken uns für die Unterstützung des Projektträger Jülich bei der Projektbearbeitung und -koordinierung. Weiterhin bedanken wir uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung. Ein ganz besonderer Dank geht an unsere Projektpartner Fischer Elektromotoren GmbH und SubCtech GmbH.

## Literatur

- [1.] Sivčev, S., Coleman, J., Omerdić, E., Dooly, G., Toal, D. (2018) Underwater manipulators: A review. *Ocean Engineering* 163 (2018) 431–450.
- [2.] Barcaro M., Bianchi N., Fornasiero E., and Magnussen F., “Experimental comparison between two fault-tolerant fractional-slot multiphase PM motor drives,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2010: Bari, Italy, 4 - 7 July 2010, Bari, Italy, 2010, pp.
- [3.] Bennett J. W., Atkinson G. J., Mecrow B. C., Atkinson D. J., “Fault-Tolerant Design Considerations and Control Strategies for Aerospace Drives,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2049–2058, 2012.
- [4.] Bluemining (2018). Breakthrough Solutions for Mineral Extraction and Processing in Extreme Environments. Abgerufen 27.09.2019 von <https://www.royalihc.com/-/media/royalihc/products/mining/deep-sea-mining/bro-blue-mining-public-report-2018.pdf>
- [5.] Brancato, E. L. (1992). Estimation of lifetime expectancies of motors. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 8(3), 5–13.
- [6.] Feldman, K., Sandborn, P., & Jazouli, T. (2008). *The Analysis of Return on Investment for PHM Applied to Electronic Systems. Prognostics and Health Management*, Denver,
- [7.] Gao, X., Niculita, O., Alkali, ., McGlinchey, D. (2018). Cost benefit analysis of applying PHM for Subsea Applications, *Proceedings of the European Conference of the PHM Society*
- [8.] Glaser M., Mahler C. (2017). Fail-Safe Functionality on Subsea Trees without utilization of mechanical Springs, *Underwater Technology Conference 2017 Bergen*
- [9.] Grieves, M. and J. Vickers (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, pp. 85–113. Springer.
- [10.] Imle S., Winter T., Popp J., Glaser M., Bertsche, B. (2019). Safety and reliability analysis of an actuation system, *European Safety and Reliability Conference Conference 2019 Hannover*
- [11.] Kahlert, A., Giljohann, S., & Klingauf, U. (2014). Cost- Benefit Analysis and Specification Of Component-Level PHM Systems In Aircrafts, *Prognostics and Health Management Society, Fort Worth , Texas USA*.

- [12.] Kaul, T., Bender, A., Sextro, W. (2019) Digital Twin for Reliability Analysis During Design and Operation of Mechatronic Systems, Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference
- [13.] Kaul, T., Meyer T., Sextro W. (2015). Integrated model for dynamics and reliability of intelligent mechatronic systems. In Podofillini et al (Ed.), European Safety and Reliability Conference (ESREL2015), London. Taylor and Francis.
- [14.] Kimotho, J. K. (2016). Development and performance evaluation of prognostic approaches for technical systems. Aachen: Shaker Verlag. Dissertation: Universität Paderborn.
- [15.] Kumar A., Moe S. (2016). Subsea Electric Systems Enter a New Era. SUT Control Down Under – 20.10.2016 Perth
- [16.] Lessmeier, C., Kimotho J. K., Zimmer D., and Sextro W. (2016). Condition monitoring of bearing damage in electromechanical drive systems by using motor current signals of electric motors: A benchmark data set for data-driven classification. In Proceedings of the European Conference of the Prognostics and Health Management Society, pp. 05–08.
- [17.] Li, C., S. Mahadevan, Y. Ling, S. Choze, and L. Wang (2017). Dynamic bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin. AIAA Journal 55(3), 930–941.
- [18.] OneSubsea (2019). Electric Low-Power Rotary Actuator. Abgerufen 27.09.2019 von <https://www.onesubsea.slb.com/-/media/cam/resources/onesubsea/product-sheets/low-power-rotary-actuator.ashx>
- [19.] Perry M., (2016). Value Proposition Subsea All-Electric. SUT Control Down Under – 20th October 2016 Perth
- [20.] Salvatore M., (2016). Subsea All-Electric Technology. SUT Control Down Under – 20th October 2016 Perth
- [21.] Sondermann-Wölke, C. (2015). Entwurf und Anwendung einer erweiterten Zustandsüberwachung zur Verlässlichkeitssteigerung selbstoptimierender Systeme. Aachen: Shaker Verlag. Dissertation: Paderborn University.
- [22.] Tecnydyne (2019). Linear Actuators. Abgerufen am 27.09.2019 von <https://tecnadyne.com/linear-actuators/>
- [23.] Ultramotion (2019). Underwater Linear Actuators. Abgerufen am 27.10.2019 von <https://www.ultramotion.com/industries/underwater-linear-actuator/>

[24.] Vichare, N., Pecht, M., 2006, "Prognostics and Health Management of Electronics" IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., 29 (1), pp. 222-229.

[25.] Zhao, F., Tian, Z., Zeng Y., (2013). Uncertainty quantification in gear remaining useful life prediction through an integrated prognostics method. Reliability, IEEE Transactions on 62(1), 146-159.

# Prilliand

## Additive Produktionstechnologie zur Herstellung Kunststoffbasierter Komponenten für maritime Anwendungen

### Autorenliste

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Pauly  
Christian Vogel  
Tobias Kastner

Wärtsilä Deutschland GmbH  
Technische Universität Dresden  
Technische Universität Dresden

---

### 1. Von der Stimme des Kunden zum Forschungsprojekt

Die Wärtsilä Deutschland GmbH (WÄD) ist Teil der finnischen Wärtsilä-Gruppe, die mit weltweit 17.500 Mitarbeitern den führenden Hersteller für Antriebslösungen in der Schifffahrt und in der Energieerzeugung darstellt.

Zur Ermittlung der Marktanforderungen führt man seit 2017 systematische, auf SixSigma basierende Befragungen bei maritimen Kunden durch. Diese „Voice-of-Customer“-Interviews mit Fokus auf Schiffswellenkomponenten – bislang häufig aus Bronze hergestellte Großbauteile mit Dimensionen von mehreren Metern und Massen von bis zu 800 kg - zeigen deutlich, dass die maritimen Kunden klare Anforderungen an die Lieferanten und deren Produkte haben:

- Kostenreduzierung
- Verkürzung der Lieferzeiten bei möglichst weltweiter Verfügbarkeit
- Verbesserung des Handlings auf der Werft und im Schiff
- Möglichkeit zur Einbettung von Sensorik

Wärtsilä selbst hat daneben – nicht zuletzt durch die „Decarbonization-Strategie“ des Konzerns – eigene, interne Anforderungen an diese Produkte:

- Minimierung des Energieverbrauchs und der Emissionen
- Maximierung des Arbeitsschutzes
- Verbesserung der Profitabilität

- Steigerung der eigenen Fertigungstiefe, Verkürzung der Lieferkette
- Realisierung individueller Geometrien mit der Option zur Einbettung von Sensorik

Die Anforderungen beider Seiten sind bei näherer Betrachtung in weiten Teilen deckungsgleich, allerdings war die Aufgabe mit dem bisherigen Stand der Technik nicht lösbar. Es bedurfte einer intensiven Forschungsleistung hinsichtlich angepasster Fertigungs- und Prozesstechnik sowie dazu geeigneten Werkstoffsystemen.

Das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der technischen Universität Dresden (TUD-ILK) verfügt über langjährige Erfahrungen bei der Konstruktion, Auslegung und Fertigung komplexer Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen sowie auf dem Gebiet des ressourcenschonenden Leichtbaus in Multi-Material-Design. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten reichen von der Materialcharakterisierung und -modellierung über die Bauteilsimulation und -auslegung sowie die Entwicklung effizienter Fertigungsprozesse bis hin zur experimentellen Prüfung von Demonstratoren. Das bei TUD-ILK vorhandene tiefgreifende Werkstoff- und Prozessverständnis gekoppelt mit dem bei WÄR vorhandenen System- und Applikationswissen ist somit idealer Ausgangspunkt, um die bisherige, konventionelle Fertigung der gängigen am Markt erhältlichen, teilweise sehr individualisierten Produktlösungen für Komponenten des Stevenrohrsystems durch eine innovative additive Fertigungstechnologie (hier mittels Fused-Granular-Fabrication (FGF)) ökonomisch und ökologisch effizienter zu gestalten.

## **2. Anforderungen und Grenzen - die Quadratur des Kreises**

Bei den beschriebenen Großbaugruppen für maritime Anwendungen handelt es sich in erster Linie um Dichtungen an Propellerwellen von seegehenden Großschiffen (siehe Abbildung 1). Diese mehrteiligen Baugruppen werden aktuell aus seewasserbeständiger Bronze hergestellt.

Die Halbzeuge werden gießtechnisch urgeformt – dabei wird die Bronze unter hohem Wärmeeintrag geschmolzen, in Hohlzylinderformen gegossen und danach abgekühlt. Allein dieser Prozess ist durch den enormen Energieaufwand und die entstehenden Emissionen nicht mehr zeitgemäß. Nach dem Guß werden die so entstandenen, bis zu 20 Einzelrohnteile auf Werkzeugmaschinen in mehrtägigen Fertigungsschritten gedreht, gefräst und gebohrt. Diese Teile sind vergleichsweise schwer und somit auch kostenintensiv und technisch aufwändig herzustellen. Die Tatsache, dass die Bronzehalbzeuge aktuell auch nur als Hohlzylinder verfügbar sind, schränkt die Designfreiheit vor dem Hintergrund der Einsparung von Rohmaterial und Ressourcen enorm ein. Die Dichtungen werden bislang fertigungsgerecht konstruiert, das heißt rotationssymmetrisch bei möglichst geringem

Nachbearbeitungsaufwand. Das Design folgt somit der Fertigungsmethode, die sich wiederum durch den Werkstoff bzw. dessen Halbzeuggeometrie ergibt. Zur Erinnerung: Bronze wurde seinerzeit aufgrund seiner Seewasserbeständigkeit gewählt. Zur damaligen Zeit – etwa um 1970 herum – war dies der einzige verfügbare Werkstoff, der den entsprechenden Anforderungen entsprach. Das aufwändige Herstellungsverfahren des gießtechnischen Urformens mit anschließenden spanendem Bearbeitungsprozessen, die hohen Kosten und das hohe Gewicht nahm man dabei in Kauf. Heute zeigen sich mit Verbundwerkstoffen und innovativen Fertigungsverfahren neue Wege auf. Additive Fertigung – gemeinhin als 3D-Druck bezeichnet – ist zwar im maritimen Maschinenbau bereits bekannt, allerdings ist es bislang nicht für Seewasseranwendungen in größeren Dimensionen eingesetzt. Die bisher verfügbaren Drucktechnologien sowie die verwendeten Materialien erwiesen sich als nicht ausreichend leistungsfähig. 3D-Druckverfahren und Verbundwerkstoffe galten bislang als ungeeignet für die Herstellung großformatiger maritimer Bauteile.



Abb. 1: Darstellung eines maritimen Antriebs- und Dichtungssystems für Großschiffe (links) und mehrteilige Stevenrohrdichtung aus Bronze (rechts)

Im Rahmen von PRILLIAND setzten die beiden Partner jetzt an der Wurzel an: Wärtsilä formulierte als Anwender eine technische Spezifikation für die exemplarische Baugruppe „Stevenrohrdichtung“ u.a. hinsichtlich Seewasser- und Medienbeständigkeit, Temperaturgrenzen sowie Festigkeiten. Ferner formulierte Wärtsilä ein Ziel für die Demonstratorbaugruppe, auch mit Hinblick auf etwaige Anwendungsszenarien im Betrieb von Großschiffen. Zur fertigungstechnologischen Umsetzung wird bei TUD-ILK eine Extrusionsanlage verwendet, die mit einer Handlungseinheit zur Realisierung der bahngesteuerten Bewegung kombiniert wird. Durch die Modifikation dieses Systems an die Herstellung rotationssymmetrischer Großbauteile, wie das Stevenrohrabdichtungsgehäuse, soll eine deutlich vereinfachte Ansteuerung und Handhabung (beispielsweise im Vergleich zu 6-Achs-Industrierobotern) sowie eine wirtschaftliche Herstellung erreicht werden. Mit der neu entwickelten

additiven Produktionstechnologie wurden anschließend Technologiedemonstratoren gefertigt und unter betriebsnahen Bedingungen getestet.

Die Kombination aus den anwendungsspezifischen Anforderungen und dem gewählten Fertigungsverfahren bildete die Grundlage für die Materialauswahl. Ausgehend von einer grundlegenden Materialcharakterisierung werden zunächst Werkstoffe für kunststoffbasierte Systemkomponenten ausgewählt, die in hybrider Mischbauweise den maritimen Anforderungen entsprechen und gleichzeitig durch die werkstoffinhärenten mechanischen und chemischen Eigenschaften sowie der korrespondierenden Konstruktionsmethodik den Stand der Technik weit übertreffen. Der ausgewählte Werkstoff sollte eine hohe Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen aufweisen, eine geringe Quellrate in Seewasser zeigen, ausreichend fest sowie temperaturbeständig sein und sich zudem für die Verarbeitung im Extrusionsprozess eignen. Die Materialauswahl wurde auf eine begrenzte Anzahl von Werkstoffen eingegrenzt, deren Beständigkeit unter anderem durch Einlagerungsversuche in biologisch abbaubaren Ölen nachgewiesen wurde. Letztlich fiel die Wahl auf ein mit 30 % Glasfasern verstärktes Polypropylen (PP30GF) als geeigneter Kandidat für die Fertigungsversuche. Die im Projekt zu erarbeitende Fertigungstechnologie und Validierungsmöglichkeiten bilden die Grundlage für die Gestaltung komplexer Großstrukturen und schaffen die Voraussetzungen für die Etablierung der neuen Bauweisen und Fertigungsverfahren im maritimen Bereich. Insbesondere soll durch die Reduktion der Herstellungskosten eine nachhaltige Stärkung der maritimen Zulieferindustrie erfolgen.

### **3. Versuchsbaugruppe AM-gerecht gedacht**

Als erste Baugruppe wurde im Rahmen des Projektes eine Stevenrohrdichtung des Typs „PSE“ (Partially Split Enviroguard) ausgewählt. Diese Stevenrohrdichtung dichtet in Schiffen bis zu einem Propellerwellendurchmesser von 320 mm den Maschinenraum gegen eintretendes Seewasser ab (siehe Abbildung 1 links). Durch die massive Auslegung des Bauteils in Verbindung mit dem Einsatz von Bronzeguss als Konstruktionsmaterial weist die PSE Baugruppe ein Gewicht von 97 kg auf. Die gezielte Bewertung der Einzelkomponenten für den Einsatz der geplanten FGF-Technologie ergibt, dass höchste ökonomische und ökologische Einsparpotential für Optimierung des Befestigungsringes. Allein die Betrachtung der spanenden Bearbeitung der Rohteile, zeigte ein hohes Spanvolumen und durch die komplexe Struktur der Funktionsflächen und Medienkanäle einen hohen Umspannaufwand, welche durch die endkonturnahe additive Fertigung reduziert werden können. Zudem konnte durch die Fertigung im FGF Verfahren eine geteilte Bauweise in Betracht gezogen werden.

Der Einsatz der in der maritimen Technik neuartigen Fertigungstechnologie bedurfte eines umfassenden Neudenkens Gestaltung der Baugruppe. Das primäre Ziel dabei ist die Erarbeitung eines CAD-Modells des Befestigungsringes der

Stevenrohrdichtung unter Berücksichtigung aller funktionellen und fertigungstechnischen Randbedingungen. Für die Basis der Konstruktion werden vielseitige Konzept hinsichtlich: Integralbauweise, Differenzialbauweise und Additive Fertigung und betrachten und zusammengeführt.

Das Resultat ist das in Abbildung 4 dargestellt und zeigt das werkstoff- und fertigungsspezifische Modell des Befestigungsringes der PSE 320. Die signifikantesten Änderungen sind:

- Konturnahes Design: Aufgrund der größeren Gestaltungsfreiheit konnte bereits das Rohteilvolumen drastisch gesenkt werden, sodass überflüssige Materialansammlungen auf ein Minimum reduziert werden
- Geteilte Bauweise: Die Bauweise zeichnet sich durch die Trennung des Dichtungsgehäuses in zwei Einzelteile aus. Durch die zweiteilige Bauweise kann ein Service oder die Erstmontage ohne Ausbau der Schiffswelle erfolgen. Dies spart dem Kunden im Reparaturfall mehrere Hunderttausend Euro und bis zu 5 Tage Reparaturzeit. Bislang war es fertigungstechnisch aber ein sehr hoher Aufwand, den drehtechnisch gefertigten Mounting Ring aus Bronze in geteilter Ausführung herzustellen.
- An allen Funktionsflächen (Dichtungen, Lager, Verschraubungen) wurde die Wandstärke erhöht, welche im nachgeschalteten Fräsprozess abgetragen wird, um eine ausreichende Oberflächenqualität zu generieren.

Es galt demnach, den Ring entsprechend umzukonstruieren, wobei die Anschlußmaße zwingend beizubehalten waren.

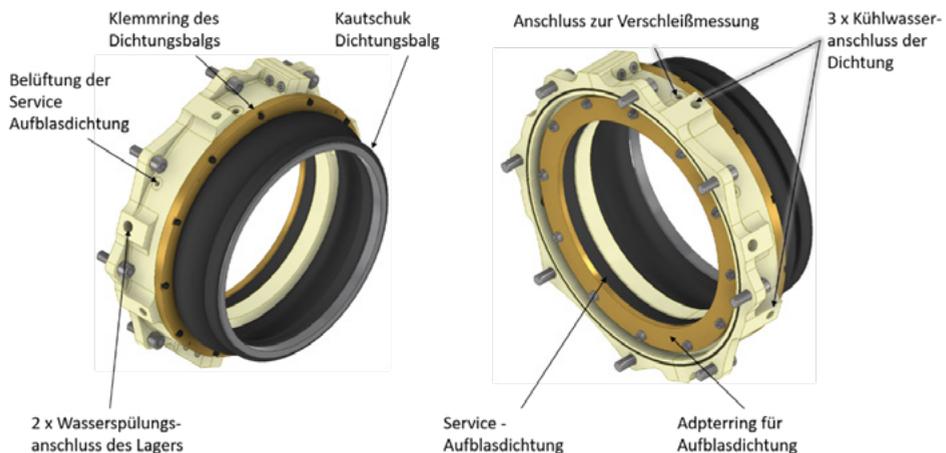


Abb. 2: Mounting Ring der PSE, AM-SM-gerecht umkonstruiert

Das Ergebnis ist ein äußerlich anderes, jedoch hinsichtlich der Schnittstellen identisches Bauteil. Es ist auch in geteilter Ausführung vorgesehen – somit hat das PRILLIAND-Teil bereits jetzt einen entscheidenden Mehrwert gegenüber dem klassischen Standard.

#### 4. Montage- und Designvergleich

Um einen Vergleich zwischen der konventionellen subtraktiven und der additiven Fertigung der Gehäuse führen zu können wurden erste Fertigungsmuster hergestellt. Im Rahmen der Demonstratorfertigung wurden die Prozessparameter so angepasst, dass ein näherungsweise optimales Verhältnis zwischen Wirtschaftlichkeit und Aspekten der Bauteilqualität erreicht wird. Dazu wurden die Korrelationen zwischen den Prozesskenngrößen in einer Parameterstudie abgestimmt und in der Anlagensteuerung implementiert. Somit kann die Reproduzierbarkeit der Fertigungsergebnisse gewährleistet werden. Alle Arbeitsschritte beider Fertigungsverfahren wurden detailliert aufgezeichnet, um Rückschlüsse für die Auswertung der ökonomischen Effektivität der additiven Fertigung zu erhalten. Aufgrund der verfahrensspezifischen Oberflächenbeschaffenheit wurden die Funktionsflächen der Fertigungsmuster durch einen nachgeschalteten subtraktiven Prozessschritt nachbearbeitet. Zur Kontrolle der definierten Toleranzen wurden die Bauteile mithilfe eines optischen Messverfahrens analysiert. Die Originale Baugruppe wurde entsprechend auf das PRILLIAND-Bauteil umgebaut und beide Versionen wurden hinsichtlich ihrer internen und externen Nutzbarkeit bewertet (siehe Tabelle 1).

Tab. 1: Vergleich Bronzebauteil vs. PRILLIAND-Bauteil

	<b>Klassische PSE in Bronze</b>	<b>Prilliand-PSE</b>
Gewicht	97 kg	40,5 kg
Kosten	100 %	80 % bei Einzelfertigung 65 % bei höheren Stückzahlen
Fertigungszeit	1 Woche Lieferzeit für Halbzeug 3 Tage CNC-Bearbeitungszeit = 10 Tage	1 Tag AM-Fertigung (Drucken) 1 Tag SM-Fertigung (Fräsen) = 2 Tage
Energieverbrauch zur Herstellung	Beschaffung %	60 %
Recyclinganteil Befestigungsring	0 %	95 %
Geteilt	Nein	Ja

Das AM-/SM-gefertigte Bauteil überzeugte durch absolute Passgenauigkeit und eine sehr hohe Oberflächengüte. Der augenscheinlichste Unterschied ist die drastische Reduzierung des Gewichtes von 97 kg auf 40,5 kg der Baugruppe. Dies in der Verbindung mit dem geteilten Design ist nach Aussage eines Service-monteurs eine enorme Erleichterung des Handlings im Schiff und eine deutliche Verbesserung des Arbeitsschutzes.

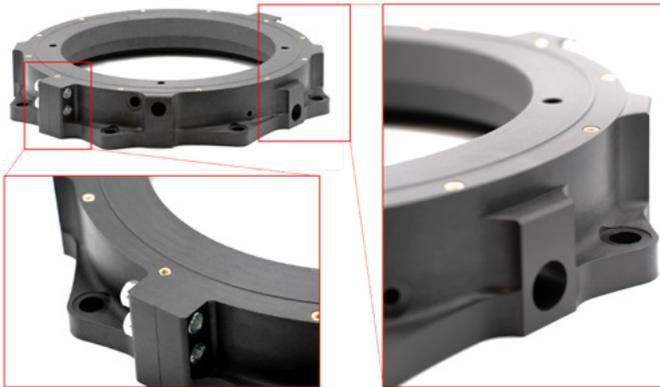


Abb. 3: Mittels AM-/SM-gefertigtes Bauteil (oben links) mit Detailansichten des Teilungsbereiches (unten) und der Verbindungsbereiche zum Einbau im Stevenrohrgesamtssystem (rechts)

## 5. Bauteilprüfung

In der traditionellen maritimen Technik konnten sich Kunststoffe im Bereich von strukturbelasteten Großbauteilen bisher nur wenig etablieren. Daraus resultierend sind nur wenige Kennwerte und Prüfergebnisse vorhanden. Die primäre Aufgabe des Befestigungsringes ist die Abdichtung der Propellerwelle gegenüber der Schiffswand. Dafür müssen die Dichtungselemente mit konstanter Anpresskraft gegen das Stevenrohr gepresst werden. Aufgrund von kunststoff-spezifischen Kriech- und Relaxationsvorgängen ist ein Lösen der Verbindung unter den im Schiff herrschenden Vibrationsbelastungen zu erwarten. Für die Untersuchung der Dichtungsstabilität wurde die Baugruppe unter Einsatzbedingungen einem Dauervibrationsbelastungstest ausgesetzt und die Verschraubungsvorspannkraft überwacht. Nachgeschaltet wurde die innere Struktur der Bauteile in CT Untersuchungen auf möglich Schäden untersucht.

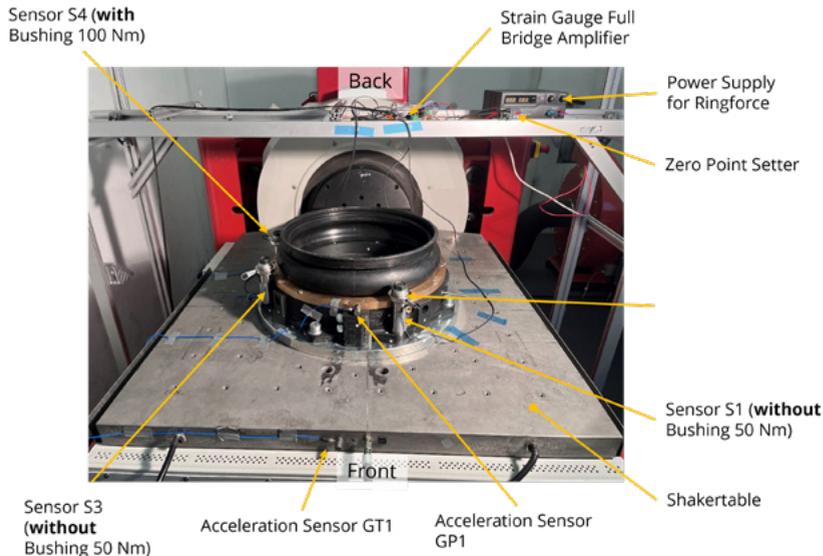


Abb. 4: Prüfaufbau Vibrationsprüfung PSE 320

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den gezielten Einsatz von verstärkenden Inserts keine Beeinträchtigungen der Dichtigkeit der Baugruppe zu erwarten ist. Zudem konnte gezeigt werden, dass durch die starken Vibrationsbelastungen keine Beschädigungen im Bauteil nachweisbar sind.

## 6. Zusammenfassung

Maritime Dichtungssysteme sind mechanisch und medial hoch beansprucht und essentiell für den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb von Schiffen. Das Stevenrohrsystem bilden dabei diejenigen Bestandteile der Schiffswellenanlage, die die Antriebswelle im Bootsrumpf abstützen und zugleich das Eindringen des Seewassers durch den Antriebswellenkanal verhindern. Aufgrund individueller Größen der Einzelkomponenten des Stevenrohrsystems und ihrer geringen Stückzahl pro Schiff werden diese bisher extrem zeit- und kostenintensiv in aufwendiger Nacharbeit als Großkonstruktionen in metallischen Gusslegierungen hergestellt. Im Verbundvorhaben PRILLIAND soll daher die konventionelle Fertigung der am Markt erhältlichen und im hohen Maß individualisierten Produktlösungen für die Komponenten des Stevenrohrsystems ökonomisch und ökologisch effizienter gestaltet werden. Durch den Einsatz innovativer additiver Fertigungstechnologien in Kombination mit modernen Leichtbauwerkstoffen werden ausgewählte Bauteile des Stevenrohrsystems neu gedacht und werkstoff- sowie fertigungsgerecht konzipiert. Dadurch werden die gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften der bisher metallischen Komponenten signifikant gesteigert. Durch die gleichzeitig erreichbare hohe Individualisierbarkeit ist zudem eine

schnelle und kostengünstige Anpassung an Kundenwünsche möglich.  
PRILLIAND bildet somit die Basis für eine effiziente Kleinstserienfertigung  
rotationssymmetrischer Großstrukturen für maritime Anwendungen.



# Deep Sea Sampling I

## Autorenliste

**Dr. Matthias Semel** Bauer Maschinen GmbH  
**Prof. Dr. Martin Sobczyk** TU Bergakademie Freiberg

unter Mitwirkung von

**Luisa Puhalo** Krebs & Aulich GmbH  
**Prof. Dr. Holger Lieberwirth** TU Bergakademie Freiberg  
**Prof. Dr. Sascha Kosleck** Universität Rostok  
**Prof. Dr. Andreas Wierschem** Friedrich-Alexander-Universität Erlangen/Nürnberg

---

## 1. Einleitung

Die Umstellung vieler Lebensbereiche von fossilen Energieträgern auf elektrische Energie aus nachhaltigen Quellen erfordert zusätzliche Investitionen in die dafür notwendige Infrastruktur. Generatoren, Transformatoren, Elektromotoren, Leistungselektronik und Leitungen benötigen Kupfer, das zusätzlich zum aktuellen Bedarf von ca. 22 Mio. Tonnen jährlich bereitgestellt werden muss. Studien gehen davon aus, dass sich der jährliche Bedarf an Kupfer bis 2050 auf ca. 50 Mio. Tonnen in etwa verdoppeln wird [1]. Da die damit hergestellten Investitionsgüter sehr langlebig sind, wird sich dieser Bedarf nur aus zusätzlichen Primärquellen decken lassen.

Im terrestrischen Bergbau werden Kupfererze heute vorwiegend in Lateinamerika und in Indonesien gewonnen. Dies sind vorrangig sulfidische Erze, die in Tiefen von ca. 1.000 Metern mit Kupfergehalten von ca. 1% oder weniger gewonnen werden. Eine deutliche Steigerung des Kupferbedarfs lässt sich aus den aktuell in Betrieb befindlichen Minen daher nur mit erheblichem Aufwand darstellen [1].

Damit kommen die schon länger bekannten marinen Ressourcen in Form der Tiefsee-Massivsulfide (SMS: Seabed Massive Sulfides) wieder mehr in den Fokus. In den Riftzonen der Ozeane bilden sich durch die Aktivität der sogenannten Schwarzen Raucher fortlaufend sulfidische Erze mit hohen Gehalten an Kupfer, Eisen, Zink, Blei und anderen Elementen [2, 3]. Deren Bildung erfolgt analog zu den heute an Land geförderten Erzen. Die SMS liegen ohne Sedimentüberlagerungen am Meeresgrund vor, und sind auch nicht durch geologische Prozesse verändert. Sie entstehen, wenn sich infolge des Auseinanderdriftens zweier ozeanischer Platten an den Mittelozeanischen Rücken Risse im Meeresboden

bilden, durch die – so die heutige Theorie – Wasser bis nahe an den magmatischen Mantel gepresst wird. Dort heizt es sich auf mehrere Hundert Grad Celsius auf und kann so, unter Druck und Temperatur stehend, Mineralien aus den umgebenden Gesteinen in Lösung bringen. Infolge der Erwärmung steigt es wieder auf und tritt dann, als saures (pH <2) und mineralisch hoch gesättigtes Wasser mit ca. 500-700°C am Meeresboden wieder aus der Erdkruste aus. Beim Kontakt mit dem dort nur ca. 2°C kalten Meeresbodenwasser fallen die gelösten Mineralien schlagartig als Partikel aus und bilden – infolge des mit in Lösung befindlichen Schwefels – sulfidische Mineralien, die als Partikelwolke eine rauchwolkenartige Erscheinung abgeben und so auch namensgebend für das Phänomen sind. Im Laufe der Zeit entstehen durch Ablagerungen schornsteinartige Strukturen, die dann durch Wachstum und Kollaps Strukturen formen, die an Trümmerhügel erinnern und Mounds genannt werden. Infolge der fortschreitenden Verkrustung, aber auch durch Plattendrift und tektonische Prozesse kommt die Aktivität im Laufe der Zeit zum Erliegen und der Schwarze Raucher wird inaktiv [4].

Während der aktiven Phase ist ein Schwarzer Raucher aufgrund der durch ihn erzeugten Wärme ein Ort, an dem Leben in unterschiedlichen Formen Ansiedlung erfährt. Nach dem Ende der Aktivität brechen die Nahrungsketten durch das Fehlen von Licht und Wärme jedoch innerhalb kurzer Zeit wieder zusammen.

Die International Seabed Authority (ISA) hat die Aufgabe übernommen, die Erforschung und Förderung dieser Ressourcen außerhalb der Exclusive Economic Zones (EEZ) auf internationaler Ebene zu koordinieren. So können sich Länder um Lizenzen für Exploration und Abbau in internationalen Gewässern bewerben, um hier die Kenntnis über die Vorkommen und ihre spätere kommerzielle Nutzung voranzubringen.

Deutschland hat im Jahr 2014 Explorationslizenzen für Gebiete in einer Größenordnung von 300.000 km im Indischen Ozean durch die ISA zugewiesen bekommen, in denen bis 2030 die Exploration stattfinden kann. Auf Basis dieser Ergebnisse kann anschließend eine Abbaulizenz für relevante Gebiete erworben werden. Hier sind viele Regularien noch nicht abschließend formuliert und durch die langen Entscheidungswege der ISA nicht immer verbindlich.

Die Exploration im deutschen Lizenzgebiet wird durch die BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) in Hannover koordiniert, die das Gebiet mit regelmäßigen, zunächst jährlichen Ausfahrten erkundet. Parallel hat Norwegen im Dezember 2023 durch Parlamentsbeschluss die innerhalb seiner eigenen EEZ liegenden Massivsulfide vor Spitzbergen für Exploration und Abbau freigegeben, die aufgrund der Nähe zu den europäischen Aufbereitungskapazitäten und durch die hinsichtlich der Regularien unkomplizierteren Verfahren von hohem Interesse sind.

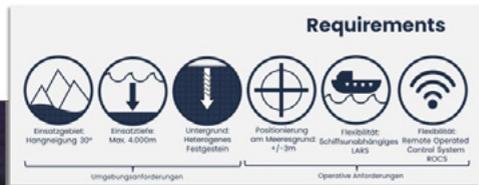
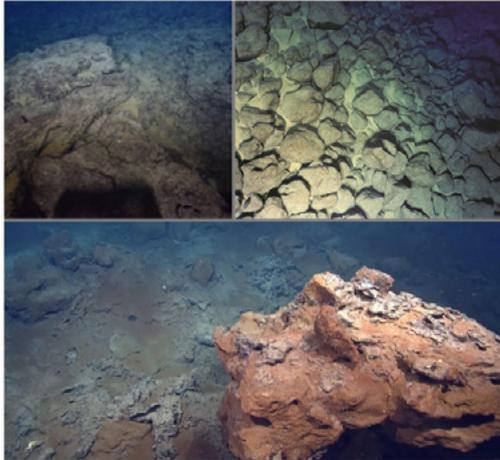
Die Suche richtet sich auf inaktive Schwarze Raucher, die keinerlei Aktivität mehr aufweisen, da Exploration an aktiven Rauchern infolge der Randbedingungen (Hitze, Druck, pH-Wert) zu aufwändig wäre und das am aktiven Raucher vorhandene Leben nicht beeinträchtigt werden soll. Inaktive Raucher finden sich meist abseits der Aktivitätszonen, so dass bei der Suche zunächst aktive Schwarze Raucher identifiziert werden, um dann in deren Umfeld inaktiven Spots zu identifizieren [5].

Die im deutschen Lizenzgebiet explorierten Gebiete enthalten Massivsulfide unterschiedlicher Zusammensetzung. An der Oberfläche eingesammelte Proben konnten zur exemplarischen Bestimmung der geotechnischen Eigenschaften, der Lage und der Zusammensetzung im Rahmen des Projektes analysiert werden.

Neben der mineralogischen Zusammensetzung interessierten für die Auslegung des Abbau-Equipments vor allem die Fragen der Druckfestigkeit, des morphologischen Aufbaus, der Dichte und der Porosität. Während eine niedrige Druckfestigkeit und eine hohe Porosität für die Gewinnung (und die zum Schneiden benötigte Energie) eher positiv zu bewerten sind, sind umgekehrt für die Standfestigkeit des Abbaugerätes eine höhere Druckfestigkeit des Gesteins und eine möglichst geringe Porosität anstrebenswert.

Die in Augenschein genommenen abbauwürdigen Mounds (Abbildung 1) liegen einerseits in Flankenbereichen der Riftzonen in Tiefen von ca. 2.500 bis 2.800 m, wobei der Untergrund hier Hangneigungen von bis zu 65° aufweist. Alternativ wurden Mounds in vergleichsweise ebenen Bereichen (Hangneigung 10°-15°) für die Untersuchung herangezogen. Infolge ihrer Bildung weisen die Mounds selbst Fußkreisdurchmesser von ca. 100 ... 200 m und Höhen von ca. 30 ... 50 m auf, so dass sie in erster Näherung als Kegelstümpfe beschrieben werden können. Sie enthalten damit je nach Dichteansatz jeweils zwischen einer und sieben Millionen Tonnen Erz.

## Umgebungsbedingungen



Lage:  
ISA-Lizenzgebiete abgelegen auf der Hohen See  
Tiefseelagerstätten (1.000-4.000m)

Abb. 1: Anforderungen von Massivlagerstätten an eine Abbautechnologie

Die Proben (Abbildung 2) weisen Dichten von ca. 1,7 und 3,3 kg/dm<sup>3</sup>, Porositäten zwischen 10 % bis 35 % und Materialdichten von 1,8 bis 4,0 kg/dm<sup>3</sup> mit einem Mittelwert von 3,8 kg/dm<sup>3</sup> auf. Dies spricht zum einen für eine hohe Konzentration an schweren Elementen sowie für einen nicht unerheblichen Anteil an Poren. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass diese Proben bisher ausschließlich von der Oberfläche der Mounds gesammelt werden konnten. Es ist anzunehmen, dass in der Tiefe infolge von Umlagerungs- und Rekristallisationsprozessen die Porosität deutlich geringer anzusetzen ist. Die mittels Punktlastversuch ermittelten und berechneten Druckfestigkeiten lagen im Mittel bei 37,5 MPa und mit einer Streuung zwischen 5 und 75 MPa, was einer vergleichsweise geringen Gesteinsfestigkeit entspricht. Infolge der Bildung durch hydrothermal entstandene Ablagerungen liegen die Proben häufig als wenig kompaktiertes Mineral mit ausgeprägten Korngrenzen vor, die sich leicht brechen lassen. Fokus für die Auslegung waren jedoch die Proben mit den höheren Festigkeiten. Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung und des Aufbaus erfolgten mittels rasterelektronenmikroskopischer Untersuchung (REM), der Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA), der Zuordnung mittels des Metal Liberation Index (MLI), der Mikrohärtigkeit der einzelnen Phasen nach Vickers, des Abrasivitätsindex (LCPC-Test) sowie der CT-Analyse zur Aufklärung der mesoskopischen Strukturen innerhalb der Proben. Hierbei konnte ein umfassendes Bild der an den Mounds zu erwartenden Oberfläche gewonnen werden.

Mittels dieser empirischen Daten sowie auf Basis von Publikationen zu Untersuchungen vergleichbarer Strukturen im Indischen und Atlantischen Ozean wurde eine erste Simulation der möglichen Lagerstättenstruktur vorgenommen, für die durch fortgesetzte Probennahme auch an tiefer gelegenen Stellen eine empirische Überprüfung erfolgen soll.

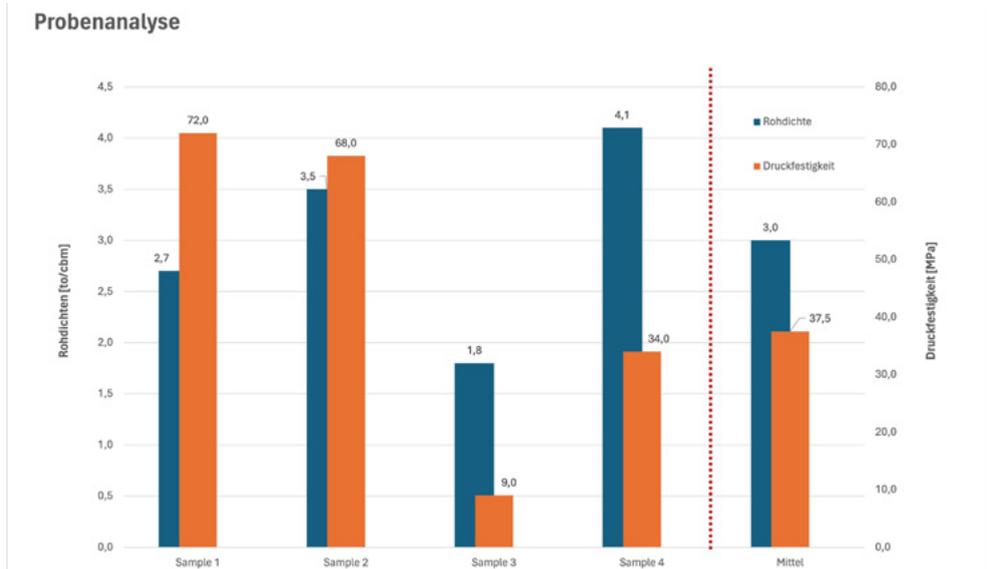


Abb. 2: Auszug aus der Probenanalyse (Druckfestigkeit und Dichte), Mittelwerte auf Basis größerer Sampleumfänge

## 2. Massivsulfid-Gewinnung mit dem Vertikalen Ansatz

Der vertikale Ansatz [6] basiert auf der Überlegung, mittels eines minimalinvasiven Verfahrens einen schonenden Abbau von Erzen in der Tiefsee zu ermöglichen. Die Mound-Struktur wird dabei nicht vollständig abgebaut, sondern mittels gezielter Einschnitte durch eine für den Bergbau ertüchtigte Schlitzwandfräse das Erz an ausgewählten Stellen entnommen.

Ausgehend von den funktionellen Anforderungen an eine Abbautechnologie wurden Funktionen und Lösungen für die einzelnen Teilprobleme abgeleitet. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der Anwendungsanalyse und des möglichen Lösungsbaumes durch das Projektkonsortium. Aufgrund der zerklüfteten und stark geneigten Hänge kann eine sichere Fortbewegung nur schwebend realisiert werden. Der Materialtransport wird aufgrund des Energiebedarfs und der Vereinfachung von An- und Abdockvorgängen durch ein seilgebundenes intermittierendes Verfahren gelöst. Als effizienteste und zugleich sicherste und minimal-invasive Technik für den Abbau wurde die Schlitzwandfräse ausgewählt.



Abb. 3: Technologieanalyse Abbaumethodik und Peripherie für eine minimalinvasive, nachhaltige und selektive Abbautechnologie (verfolgte und mit POC überprüfte Technologien in grün)

Das gesamte System ist als geschlossenes System konzipiert, welches auf dem erhaltenden Mound aufgesetzt wird. Nach Absenken und Ausrichtung der Fräse wird die Eingriffsstelle abgeschirmt, ehe der Fräsvorgang beginnt. Eine Pumpe, die unablässig das zwischen den beiden sich gegenläufig drehenden Fräsrädern gelockerte Erz ansaugt, sorgt so für einen gegenüber der Umgebung leichten Unterdruck, so dass keine Trübewolke entstehen kann. Mittels der Pumpe werden die Erzpartikel in den passiv wirkenden Separationsbehälter gefördert, wo sie durch eine Kombination aus Lammellenklärer und einem, einem Hydrozyklon ähnlichem, Aufbau vom Wasser separiert werden. Ist der Behälter mit Erz gefüllt, wird er vom System abgedockt, verschlossen und nach oben zum Schiff gefördert, so dass auch hier keine unerwünschten Trübewolken entstehen können.

Im Rahmen des Projektes wurde daher auf eine aus dem terrestrischen Tiefbau bekannte Schlitzwandfräse zurückgegriffen, deren Wirkprinzip – zwei gegenläufig zur Mitte rotierende Fräswalzenpaare und ein dort angesetzter Absaugkasten zur Materialentnahme – für den ersten Schritt unverändert blieb (Abbildung 4). Dieser Fräskopf selbst befindet sich in einem Fräsrahmen, der alle für die Steuerung des Fräsvorganges notwendigen Einrichtungen enthält. Der Vortrieb wird in diesem Fall durch die Schwerkraft erzeugt, und kann durch eine Haltekraft über eine Seilvorspannung im Rahmen gesteuert werden. Für den Einsatz in der Tiefsee musste das Absaug- und Fördersystem neu konzipiert werden, insbesondere der Separationsbehälter, der das geförderte Material aufnehmen soll. Ebenso wurde der Antrieb des Fräskopfes – bisher hydraulisch- elektrisch ausgelegt, um hier mit

einem höheren Wirkungsgrad und einem geringeren Risiko hinsichtlich Öleintrag arbeiten zu können. Gleichzeitig sind für den Einsatz in der Tiefsee eine Skalierung und Adaption der Technik an die Tiefsee notwendig. Abbildung 4 zeigt die erfolgte Modularisierung, Skalierung und Adaption der Schlitzwandtechnik an die Anforderungen der Tiefsee

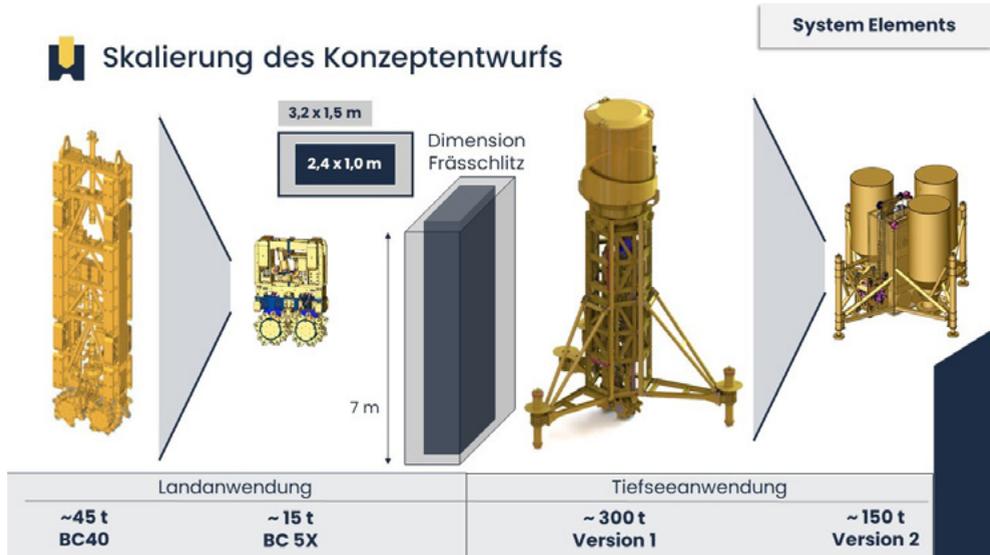


Abb. 4 Skalierung und Adaption der Schlitzwandtechnik an Land an die Anforderungen der Tiefsee

### 3. Ausführungskonzepte für die Tiefsee

Wesentliche Punkte für das Projekt Deep Sea Sampling I waren die Technologieentwicklung für die folgenden Fragestellungen:

- effiziente und minimalinvasive Abbautechnologie
- smarte, autonome Systeme
- Separations- und Transportsystem für das gewonnene Erz

Über Proof of Concepts wurden die Tauglichkeit/Reife der Lösungen auf TRL4 nachgewiesen und das Gesamtkonzept von TRL 2 auf TRL 4 erhöht

#### 3.1. Effiziente und minimalinvasive Abbautechnologie

Ausgehend von der Landanwendung wurde zunächst über eine umfangreiche Anforderungsanalyse die Schlitzwandtechnologie in Kombination mit einem Trübekasten und einer Integration der Separation und des Transportes als optimale Technik identifiziert. Aufgrund der Leistungsdichte, der besseren Ansteuerung und

hohen Umgebungsdrücke in der Tiefsee musste hierzu nun die Schlitzwandfräse elektrifiziert werden.

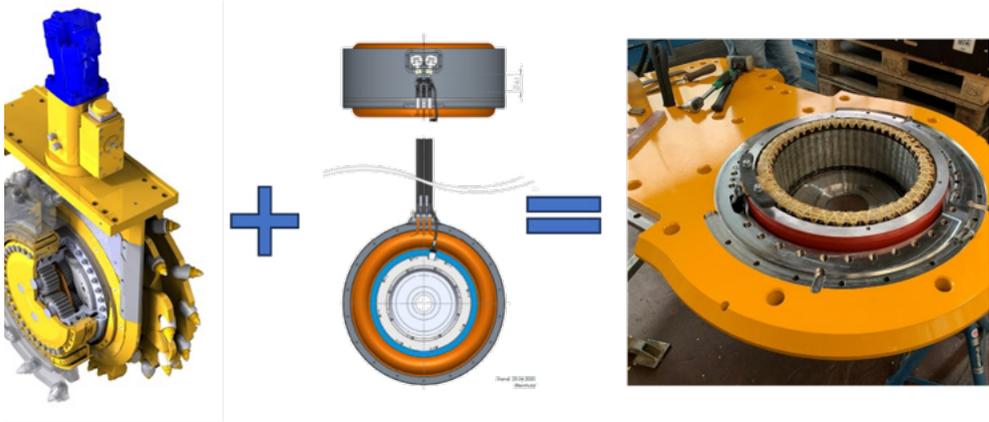


Abb. 5: Konzept DirectDrive Fräseinheit: Elektromotor als integraler Bestandteil des Fräsgetriebes

Nach Konzeptionierung und Entscheidung für das integrierte Fräsgetriebe wurden die Antriebe berechnet und konstruiert. Mittels Vorstudien und Wickelversuchen konnten Montage und Einbautests umgesetzt werden, ehe die ersten Prototypenmotoren in den Bau gingen. Diese wurden zunächst mit Hilfslagerschilden ausgestattet und einem umfangreichen Testprogramm unterzogen, ehe die Montage in den Fräsgetrieben beim Konsortialführer erfolgte. Die dann folgenden finalen Tests im back-to-back-Betrieb, bei dem beide Getriebe gegeneinander liefen und so wechselseitig die Belastung durch den Bodeneingriff bzw. den motorischen Antrieb simulierten, konnten die aus der Berechnung erwarteten Werte empirisch bestätigt werden: im Dauerbetrieb kann pro Fräsradsatz die geforderte Dauerleistung bei einem Gesamtwirkungsgrad von über >85% abgegeben werden, eine Überlast bis zu 30% Leistungserhöhung ist möglich. (Abbildung 6 und Abbildung 7).

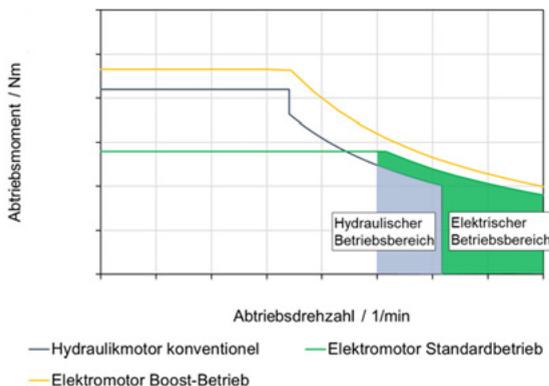


Abb. 6: gezielte Erweiterung des Betriebsbereichs durch elektromotorische Anwendung



Abb. 7: Aufbau Back-to-Back Prüfstände für Motor- (links) und Getriebetest (rechts)

### 3.2. Smarte autonome Systeme

Für die Navigation unter Wasser stehen satellitengestützte Systeme nicht zur Verfügung. Knapp unter der Wasseroberfläche reißt die Kommunikation mit Satelliten ab, und eine drahtgeführte Schwimmerlösung verbietet sich in Anbetracht der für das Projekt zu erreichenden Wassertiefen bis zu 4.000 m. Darüber hinaus soll nicht nur die Position des Templates sicher bestimmt werden, sondern auch für den im Einsatz befindlichen Fräskopf interessieren zur Messung von Abbaufortschritt und zur Korrektur von Richtungsschwankungen Lage und Bewegungsrichtung.

Grundsätzlich lassen sich diese Fragen mittels Inertialer Messeinheiten (IMU: Inertial Measurement Units) lösen [7]. Diese integrieren unter Nutzung verschiedener Filter die Signale von Beschleunigungs- und Drehraten-Sensoren in den drei Raumrichtungen x, y, und z. Um jedoch zu genauen Ergebnissen zu kommen, ist eine sehr gute Kalibrierung der Sensoren vor Messbeginn erforderlich, ebenso die Kompensation der Messsignale hinsichtlich Druck- und Temperaturschwankungen.

Das Positioniersystem konnte innerhalb des Projektes in fünf Funktionsmusterbaustufen entwickelt und getestet werden. Vorrangig war hier die Entwicklung von Filter-Algorithmen, um eine Signal-Entrauschung bei gleichzeitig geringer zeitlicher Dämpfung zu erreichen. Tests der einzelnen Baumuster erfolgten zunächst in Bergwerkschächten bis 750 m Tiefe, um durch Signal-Integration entstehende Sensordriften experimentell untersuchen zu können, sowie abschließend Tests an der Modelleinrichtung im Unterwasserversuch an der Universität Rostock. Parallel wurde eine mobile Kalibereinheit entwickelt, um eine möglichst exakte Sensorkalibrierung vor Versuchsstart zu ermöglichen.

Um für einen dauerhaften Unterwasser-Betrieb ausgelegt zu sein, muss der Verschleiß von Werkzeugen im Prozess erkannt und ein entsprechender Werkzeugwechsel eingeleitet werden. Auch hier wurden basierend auf einer Ist-Zustandsanalyse Lösungskonzepte entwickelt und in einem iterativen Auslegungsprozess bis hin zu einem Proof of Concept entwickelt.

Das validierte Konzept basiert auf zwei Elementen: zum einen wurde durch Datenfusion und Datenverdichtung während des Löseprozesses bei Landanwendungen und durch Laborversuche ein Modell zur Verschleißprognose und zum anderen eine Auslegungsmethodik für eine optimale (hinsichtlich Leistungsbedarf und Fortschritt und Fräsgutgröße) Fräsradgeometrie zu der zu erwartenden Gesteinscharakteristiken entwickelt. Beide Elemente bedingen schließlich das Konzept für einen kompletten Fräsrادwechsel. Hierzu wurden mehrere unterschiedliche konstruktive Lösungen erarbeitet und simulativ untersucht, Schwerpunkt hierbei das Spann- und Handlingssystem, um mit den ca. 1,5 Tonnen schweren Einheiten sichere und winkelgenaue Bewegungen auszuführen. Der Proof of Concept erfolgte an einem 3D-Druck Demonstrator aus Aluminium und Kunststoff im Maßstab 1:1.

### **3.3. Separations- und Transportsystem für das gewonnene Erz**

Ein wesentlicher Punkt für die sichere Förderung des abzubauenen Erzes stellen die Separation und der Transport dar. Im Rahmen der Arbeiten an der FAU wurden hier Konzepte für einen möglichen Separationsbehälter für den Unterwasser-Einsatz sowie Transportkonzepte hinsichtlich Größe, Auslegung und Anordnung untersucht. Der entwickelte inverse Auslegungsansatz basierend auf CFD-Simulationen wurde an einem Prüfstand validiert. Als Ergebnis aus DSS liegt somit eine validierte Auslegungsmethodik sowie der erfolgreiche Proof of Concept zur energieeffizienten Separation am Meeresboden vor.

Nicht zuletzt die Frage nach Aufbau, Ausrichtung und zulässigen Massen beeinflusst maßgeblich Konzept und Aufbau einer komplexen Abbau-Vorrichtung. Mittels der zur Verfügung stehenden und im Projekt fortlaufend ermittelten Daten wurden die Bedingungen an der Abbaustelle makroskopisch sowie im Werkzeugeingriff mesoskopisch modelliert. Weiterhin wurde die Wirksamkeit des Trübeschutzes am Prüfstand nachgewiesen.

## **4. Öffentlichkeitsarbeit**

Der Projektfortschritt wurde durch Öffentlichkeitsarbeit begleitet. Tiefseebergbau gilt in der öffentlichen Wahrnehmung häufig als problematisch, so dass eine umfassende Information und eine hohe Transparenz über geplante Schritte und Maßnahmen unerlässlich sind. Zentraler Ankerpunkt ist dabei die Projektwebsite [www.deepseasampling.de](http://www.deepseasampling.de), auf der über aktuelle Projektfortschritte berichtet

wird, aber auch Arbeiten und Artikel zu den Themenkomplexen rund um den Tiefseebergbau gesammelt werden.

Im Fachjournal «GlückAuf! – Mining Report» sind bereits zwei Artikel zu Detailthemen erschienen (Positionsdatenbestimmung mittels inertialer Messsysteme, automatisierter Werkzeugwechsel in der Tiefsee), zwei weitere sind in Vorbereitung für die kommenden Ausgaben (Gewinnung von Kupferrohstoffen in der Tiefsee, Elektrischer Fräsantrieb).

Auf den Veranstaltungen der Underwater Minerals Conference (UMC) war das Projekt mit Fachvorträgen und Posterpräsentationen 2022 St. Petersburg, FL, USA, 2023 in Rotterdam und 2024 auf den Cook Islands vertreten. Hinzu kamen Präsentationen bei der Ocean Technology Conference (OTC) 2023 in Houston Texas, USA.

Die erste Unterwasser-Erprobung der im Rahmen des Projektes gebauten Modelleinrichtung wurde durch den NDR-Rundfunk mit einer Radio- und einer TV-Reportage begleitet. Das Projekt selbst wurde auf der Bauma 2022 mit dem Bauma Innovation Award ausgezeichnet, eine im Rahmen des Projektes erstellte Masterarbeit gewann 2022 den Schubert-Preis.

## **5. Ausblick DSS II**

Im Rahmen der Arbeiten im Projekt Deep Sea Sampling I konnten die Grundlagen der Abbautechnologie im Tiefseebereich definiert werden. Für den künftigen Einsatz unter Wasser sind weitere Entwicklungsschritte in drei Handlungsfeldern erforderlich.

1. Exploration
2. Pilot Mining
3. Extraktion

Der erste Themenkomplex umfasst die Fragen der Mächtigkeit und der geotechnischen Eigenschaften des Erzkörpers. Die Anforderungsanalyse aus DSS I hinsichtlich dieser Fragestellung hat aufgezeigt, dass die aktuelle Datenbasis hierzu zu gering ist. Bezüglich der Zusammensetzung des Erzkörpers liegen zunächst nur einzelnen oberflächennahe Bohrkern und Analysen zu von der Oberfläche geborgene Proben vor. Die Verteilung und Zusammensetzung in der Tiefe sind unbekannt. Weiterhin kann die Standfestigkeit des Bodens und damit auch das zulässige Gewicht einer Abbaueinheit und die genaue Abbausequenz nicht ermittelt werden. Hierzu ist es also zunächst notwendig, eine Explorationsplattform für Massivsulfide zu entwickeln und gleichzeitig während des Projektes

geotechnische Untersuchungen an erloschenen schwarzen Rauchern durchzuführen. Es soll ein virtueller Zwilling eines erloschenen Schwarzen Raucher entstehen.

Der dritte Themenkomplex sollen diese Erkenntnisse und der virtuelle Mount als Basis dienen, um eine Abbausequenz für eine solche Lagerstätte zu entwickeln und diese hinsichtlich von Nachhaltigkeitskriterien auch zu bewerten. Die Abbausequenz, die Anforderung des virtuellen Mounts, sollen schließlich als Grundlage für die Entwicklung des Pilot Mining Konzeptes dienen. Hier sollen die entwickelten Technologien aus DSS I weiterentwickelt werden und das gesamte Konzept so weit reifen, dass nach Abschluss von DSS II die Frage beantwortet werden kann, ob es und wenn ja auch wie eine minimalinvasive nachhaltige Bergbautechnologie für die Massivsulfide in der Tiefsee aussehen könnte.

## Literatur

[1] Wood Mc Kenzie: World Copper Report, 2019

[2] Sharma, R.: Deep-Sea Mining. Resource Potential, Technical and Environmental Considerations, Springer-Verlag, 2017.

[3] Johnson, K.; Dalton, G.; Masters, I.: Building Industries at Sea: "Blue Growth" and the New Maritime Economy, River Publishers, 2018.

[4] Buschette, M.: Hydrothermal Alteration and Lithogeochemistry of the Boundary Volcanogenic Massive Sulfide (VMS) Deposits, Master Thesis, Department of Earth Science, Memorial University of Newfoundland, 2015

[5] Dombrowsky, J. M.; Resource and Reserve Classification of a Solwara 1 type Deposit at an Arctic Mid Ocean Ridge, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geoscience and Petroleum, 2018.

[6] Post, J., Schreiner, V. und Weixler, L.:The "Vertical Approach" – a Sustainable Solution for Deep-Sea Mining and Sampling, MiningReport Glückauf 157 (2021), No. 3, S. 258ff.

[7] Dong, Y. (2013). Mems for Automotive and Aerospace Applications || MEMS inertial navigation systems for aircraft. , (), 177-219. doi:10.1533/9780857096487.2.177





# Folami

## Formschlüssiges Laserstrahlschweißen der Mischverbindung aus Stahl und Aluminium für betriebsfeste Halbzeuge im Schiffbau

### Autorenliste

Dr.-Ing. Rabi Lahdo	Laser Zentrum Hannover e.V.
Dr.-Ing. Sarah Seffer	Laser Zentrum Hannover e.V.
Dr.-Ing. Jörg Hermsdorf	Laser Zentrum Hannover e.V.
Dr.-Ing. Benjamin Möller	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Dr.-Ing. Jörg Baumgartner	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Tim Korschinsky, M. Sc.	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Dipl.-Ing. (FH) Christoph Wendt	B.I.G. Technology Services GmbH
Dr. Laura Vietze	Precitec Optronik GmbH
Dr.-Ing. Markus Kogel-Hollacher	Precitec Optronik GmbH
Dr.-Ing. Oliver Meier	LASER on demand GmbH

---

### 1. Einleitung

Leichtbaukonstruktionen sind nicht nur für den Automobilbau [1], sondern auch für den Schiffbau [2, 3] eine gute Möglichkeit, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch einen geringeren Kraftstoffverbrauch zu reduzieren [4, 5]. Das Leichtbauprinzip kann z. B. durch den Einsatz von Hybridwerkstoffen umgesetzt werden. Im Schiffbau werden für verschiedene Baugruppen Werkstoffkombinationen aus Stahl- und Aluminiumlegierungen eingesetzt. Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ist oft eine Kombination aus hochfestem Stahl und leichten Aluminiumlegierungen von Interesse. So wird beispielsweise im Yachtbau der Rumpf häufig aus Stahl und der Aufbau aus Aluminiumlegierungen gefertigt [6]. Neben der Gewichtsreduzierung wird durch die intelligente Anordnung der verschiedenen Materialien mit ihren spezifischen Eigenschaften eine Absenkung des Schiffsschwerpunktes zur Stabilisierung des Schiffes erreicht. Bisher werden solche Bauteile mittels eines explosionsgeschweißten Adapters [7, 8] gefügt, dessen Herstellung zeit- und kostenintensiv ist. Dieser Adapter weist eine hervorragende Verformungsfähigkeit auf, allerdings mit dem Nachteil einer geringen übertragbaren Kraft, sodass die Adapter mit Überdimensionierung eingesetzt werden [3].

Das Laserstrahlschweißen bietet mit seinen spezifischen Vorteilen, wie hohe Schweißgeschwindigkeit, geringe Wärmebelastung und lokales Aufschmelzen der Fügepartner, eine vielversprechende Alternative für die Herstellung von Adaptern aus Stahl und Aluminium. Zusätzlich zu den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der beiden Metalle muss die Bildung intermetallischer Phasen berücksichtigt werden [9]. Insbesondere die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten können beim Abkühlen zu Spannungsfeldern in der Schweißnaht führen [10, 11]. Solche Spannungsfelder können die Schweißnaht schwächen und zum Versagen ohne äußere Belastung führen. Die Bildung von harten, spröden intermetallischen Phasen, wie  $\text{FeAl}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{FeAl}_3$ , ist auf die begrenzte Löslichkeit der Elemente zurückzuführen [9, 12, 13, 14]. Neben der Bildung von intermetallischen Phasen verbinden sich Eisen und Aluminium in Form von ungeordneten Mischkristallen und Überstrukturen (geordnete Mischkristalle) [12, 13]. Dabei hängen die mechanischen und metallurgischen Eigenschaften vom Aluminiumgehalt ab. So weisen beispielsweise Gefüge mit einem Aluminiumgehalt von etwa 9,0 at-% ein duktileres Bruchverhalten auf [15].

Das Laserstrahlschweißen dieser Mischverbindung wurde bereits im Dickblechbereich [16, 17] untersucht. Als vorteilhaft hat sich der Überlappstoß erwiesen, bei dem das Stahlblech auf dem Aluminiumblech positioniert wird. Durch vollständiges Durchschweißen des Stahlblechs ( $t = 5 \text{ mm}$ ) in Kombination mit Einschweißen in die Aluminiumlegierung ( $t = 8 \text{ mm}$ ) wird ein Gefüge mit vergleichsweise geringerem Aluminiumgehalt erzielt. Dies kann durch die Einstellung der Einschweißtiefe in den Aluminiumwerkstoff erreicht werden. Mit Hilfe von Scherzugversuchen wurde ein optimaler Einschweißtiefenbereich von etwa  $t_E = 1,5 \text{ mm}$  ermittelt. So erreichten die Mischverbindungen eine Scherzugkraft von etwa  $F_S = 9 \text{ kN}$ . Anhand des Bruchbildes konnte festgestellt werden, dass auch ein Teil des Aluminiumgrundmaterials herausgebrochen ist. Oberhalb dieses Eindringtiefenbereichs führen die Gefügeversprödung durch den erhöhten Aluminiumgehalt und die zunehmende Risslänge zu einer Verringerung der Verbindungsfestigkeit. Da die Kraftübertragung in der Mischverbindung nicht nur stoffschlüssig, sondern auch formschlüssig ist, kommt es unterhalb dieses Eindringtiefenbereichs zu einem reduzierten Anteil der formschlüssigen Kraftübertragung und damit zu einer reduzierten Scherzugkraft. Die Zugproben versagen durch Ausknöpfen der Schweißnaht. Einen im Vergleich zur Scherzugbelastung kritischeren Lastfall stellt die Kopfzugbelastung dar. Die Mischverbindungen zeichnen sich durch eine deutlich geringere Kopfzugkraft von etwa  $F_K = 3,5 \pm 1,22 \text{ kN}$  [17] bei optimierter Einschweißtiefe aus. Eine zunehmende Einschweißtiefe könnte zur Festigkeitssteigerung führen, jedoch führen die Gefügeversprödung und das hohe Rissaufkommen oberhalb der optimierten Einschweißtiefe zum Versagen der Mischverbindung im Schweißgut.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich der positive Effekt der Einschweißtiefe und der negative Effekt der Gefügeversprödung im Hinblick auf die metallurgischen und mechanischen Eigenschaften von laserstrahlgeschweißten Mischverbindungen aus Stahl und Aluminiumlegierungen gegenüberstehen. Für eine mögliche Anwendung im Schiffbau sind höhere max. Kopfbzugkräfte erforderlich, um ein frühzeitiges Ausknöpfen der Naht zu vermeiden. Hierfür bedarf es eines neuen Lösungsansatzes, mit dem höhere Verbindungsfestigkeiten zu erreichen sind.

### Zielsetzung und Lösungsansatz

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, dickwandige Mischverbindungen aus Stahl und Aluminiumlegierung mit hohen Verbindungsfestigkeiten unter Anwendung einer neuartigen Methode herzustellen. Durch zwei sich kreuzende Laserstrahlen wird ein Hinterschnitt zwischen dem oberen Stahl S355 und der unteren Aluminiumlegierung EN AW-6082 T651 der im Überlapp geschweißten Mischverbindungen erzeugt, was die Wirkung des Formschlusses verstärkt. In Abb. 1 ist die Schweißmethode mit der Vorgehensweise dargestellt.

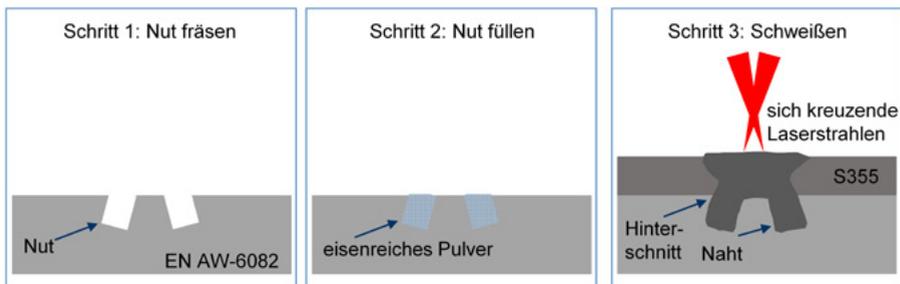


Abb. 1: Schweißmethode mit der Vorgehensweise

Bei diesem Verfahren wird eisenhaltiges Schweißpulver verwendet, das in eine in das Aluminiumblech eingebrachte Nut gefüllt wird. Anschließend werden das Stahlblech, das Schweißpulver und die Aluminiumlegierung zusammengeschweißt. Die Verwendung von Nuten mit eisenreichem Pulver kann zu einem Gefüge mit geringem Aluminiumanteil und damit zu besseren mechanischen und metallurgischen Schweißnahteigenschaften führen. Zum anderen wird durch die Konfiguration ein Formschluss begünstigt, der zu einer höheren Nahtfestigkeit führt. Um die Nut vollständig zu erfassen, werden zwei Einschweißtiefenregelungssysteme auf Basis der Analyse der spektralen Prozessemissionen und auf Basis der Kurz-Kohärenz-Interferometrie entwickelt. Für die Umsetzung der Einschweißtiefenregelung ist die Entwicklung eines adäquaten Laserbearbeitungskopfs essentiell. Begleitet werden die experimentellen Untersuchungen durch numerische Untersuchungen, um zu einer zielgerechten Schweißprozessentwicklung zu führen. Mit Hilfe des Modells wird eine optimierte Schweißnahtgeometrie insbesondere in Bezug auf die Nutgeometrie ermittelt.

### **3. Entwicklung eines Laserbearbeitungskopfes mit Inline-Einschweißtieffenregelung**

Der Laserbearbeitungskopf mit der erforderlichen Systemtechnik wurde in Anlehnung an das zu Projektbeginn erstellte Lastenheft erfolgreich entwickelt. Dabei wurde der Laserbearbeitungskopf auch für das Schweißen unter Einsatz von innovativen Faserlaserstrahlquellen des Typs HighLight FL-6000 ARM von der Coherent Deutschland GmbH konzipiert. Diese Laserstrahlquelle ist mit einer innovativen Strahlformung ausgestattet, welche eine Anpassung des Intensitätsprofils erlaubt. Die Umsetzung erfolgt über zwei ineinander angeordneten Lichtleitfasern. Die innere Lichtleitfaser hat einen Durchmesser von  $70\ \mu\text{m}$  und die äußere Lichtleitfaser einen Durchmesser von  $180\ \mu\text{m}$ . Der Laserbearbeitungskopf besteht aus einem Spiegel- und Linsensystem. Die Fokussierlinse ist durch eine Fokussierbrennweite  $f_f$  von  $500\ \text{mm}$  und die Kollimationslinse durch eine Kollimationsbrennweite  $f_k$  von  $172\ \text{mm}$  gekennzeichnet. In Kombination mit dem verwendeten Lichtleitfaserdurchmesser ergibt sich hierbei ein Fokusdurchmesser von  $d_k = 203\ \mu\text{m}$  im Kern und  $d_r = 523\ \mu\text{m}$  im Ring (Abbildungsverhältnis: 1:2,9). Der Laserbearbeitungskopf besitzt zudem ein Scannersystem, mit dem eine Pendelbewegung des Laserstrahls über einen beweglichen Spiegel ermöglicht wird. Die maximale Pendelfrequenz beträgt  $100\ \text{Hz}$  und die maximale Pendelamplitude  $4\ \text{mm}$ . Über die Bereitstellung adäquater Schnittstellen wurden sowohl das Spektrometer als auch der IDM-Sensor (IDM: In-Process Depth Meter) im Laserbearbeitungskopf implementiert. Für die Verwendung beider Systeme wurden die teildurchlässigen Spiegel vor dem Spektrometer und dem IDM-Sensor konzipiert und entwickelt.

Die Spezifikationen der optischen Komponenten sind so ausgelegt, dass zum einen die benötigte Laserstrahlung in die Prozesszone und zum anderen die sekundären Prozessemissionen auf umgekehrtem Wege in eine Faseraufnahme und damit zum Spektrometer geführt werden können. Analog hierzu kann durch die entsprechend ausgelegten optischen Komponenten das Einschweißtieffenregelungssystem auf Basis der Kurz-Kohärenz-Interferometrie mit einer spezifischen Wellenlänge verwendet werden. Der entwickelte Laserbearbeitungskopf und die optischen Eigenschaften der teildurchlässigen Spiegel für Spektrometer und IDM-Sensor sind in der Abb. 2 zu sehen.

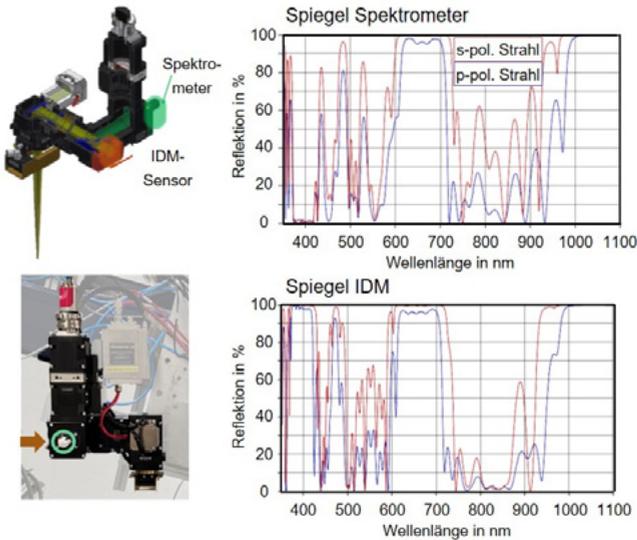


Abb. 2: Entwickelter Laserbearbeitungskopf und die optischen Eigenschaften der teildurchlässigen Spiegel für Spektrometer und IDM-Sensor

Der Spiegel für das IDM ist für die Wellenlänge des IDM-Sensors von 825 nm bis 835 nm transmissiv und für die Wellenlänge des Spektrometers von 380 nm bis 440 nm, für die Wellenlänge des Pilotlasers von 660 nm sowie für die Wellenlänge der Laserstrahlung von 1.070 nm reflektiv. Hingegen muss der Spiegel für das Spektrometer für die Wellenlänge des Spektrometers von 380 nm bis 440 nm transmissiv und für die Wellenlänge des Pilotlasers von 660 nm sowie für die Wellenlänge der Laserstrahlung von 1.070 nm reflektiv sein.

#### 4. Aufbau eines numerischen Modells zur Beanspruchungsvorhersage

Um eine Schweißnahtkonfiguration mit möglichst hoher Festigkeit zu ermitteln, wurden FE-Berechnungsmodelle unter Variation der Einschweißtiefe und des Winkels der Schweißnaht erstellt, siehe Abb. 3. In diesem Zusammenhang wurden zwei Belastungskonfigurationen: Kopfzug- ( $F_1$ ) und Scherzugbelastung ( $F_2$ ) betrachtet. Im Bereich der Schweißnaht wurde zusätzlich mit einem reinen Formschluss (Kontaktbedingung; Worst-Case: keine metallurgische Anbindung) und einem Stoffschluss („TIE“-Bedingung) gerechnet.

Eine Bewertung der modellierten Schweißverbindungen erfolgt anhand der berechneten maximalen Beanspruchungen in Anlehnung an die Peak Stress Method. Wichtig ist hierbei zu nennen, dass die Elementkantenlänge immer konstant gewählt wurde, um einen Einfluss der Elementgröße auf die berechneten maximalen Spannungen (an den Singularitäten) auszuschließen.

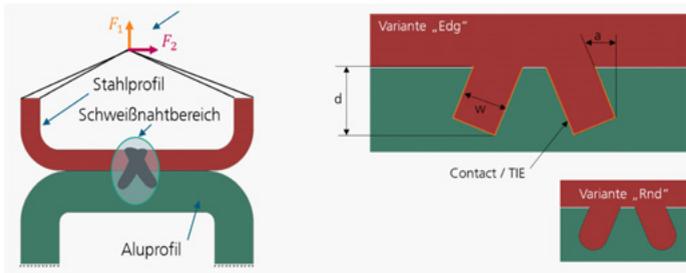


Abb. 3: Aufbau und Randbedingungen des Finite-Elemente-Berechnungsmodells (links) und Details zur Schweißnahtmodellierung (rechts)

Insgesamt wurden ca. 1.000 Varianten mit unterschiedlichen Geometrieparametern durchgerechnet. Als Größe zur Bewertung der Naht- und Werkstoffbeanspruchungen wurde die maximale Hauptnormaldehnung verwendet. Aus den Untersuchungen lassen sich Nahtkonfigurationen identifizieren, die zu einer geringen Beanspruchung an der Naht, sowohl auf der Aluminiumseite als auch der Stahlseite, führen.

Bei den Proben mit Kontaktbedingungen (ohne Formschluss) zwischen Stahl- und Aluminiumwerkstoff im Bereich der Schweißung zeigen sich die höchsten Beanspruchungen grundsätzlich an der Schweißnahtwurzel bzw. am Übergang von Blech zur Schweißnaht im Stahlwerkstoff, siehe Abb. 4 (links). Eine Auswertung der Matrixplots, in dem farblich die Spannungswerte über die Parameter „Einschweißtiefe“ und „Nahtwinkel“ aufgetragen sind, ergibt, dass die geringsten Beanspruchungen bei „mittlerer“ Einschweißtiefe  $t_E$  (ca. 2 – 3 mm), „mittlerer“ Nutbreite  $b_N$  (ca. 2 mm) und Winkeln  $\alpha$  im Bereich von 15° bis 30° auftreten. Diese Konfiguration erscheint geeignet zu sein, um eine möglichst hohe Beanspruchbarkeit zu erzielen.

Eine Auswertung der Berechnungen mit „TIE“ (Verbindung von Stahl und Aluminium ohne Relativbewegung) zeigt, dass bei metallurgischer (= stoffschlüssiger) Anbindung das Versagen im Stahlwerkstoff und im Detail am Übergang von Blech zu Schweißnaht zu erwarten ist, siehe Abb. 4 (rechts). Die Schweißnahtkonfiguration hat in diesem Fall keinen Einfluss auf die Beanspruchung.

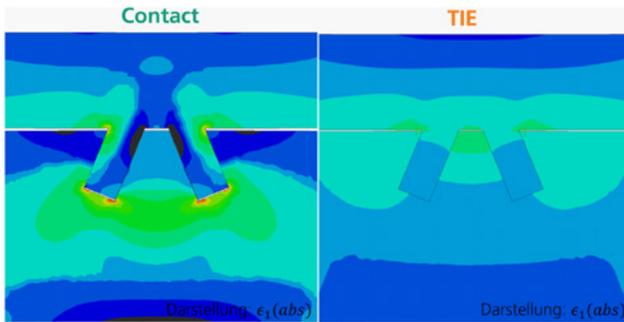


Abb. 4: Unterschied in den Beanspruchungen zwischen Modellierung mit „Contact“ (links; Worst Case) und TIE (rechts; Best Case) unter Kopfzugbelastung

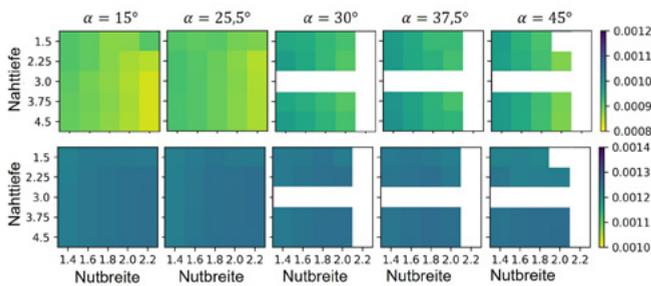


Abb. 5: Auswertung der maximalen Dehnungen (Einschweißtiefe über Nutbreite) für alle untersuchten Schweißnahtwinkel für die Aluminiumseite (obere Reihe) und die Stahlseite (untere Reihe), beispielhaft für Kopfzugbeanspruchung und „TIE“-Definition

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine metallurgische Verbindung in jedem Fall anzustreben ist, da damit die maximale globale Beanspruchung signifikant reduziert werden kann. Als Voraussetzung ist zu nennen, dass möglichst keine rissartigen Strukturen nach dem Schweißen und keine Gefügeversprödung vorhanden sein sollten. Diese wurden nicht in dem Modell berücksichtigt und können einen signifikanten Einfluss auf die Beanspruchbarkeit haben. Gerade wenn keine ideale Anbindung im Bereich der Schweißnaht erreicht werden kann, sollte eine Schweißnahtkonfiguration verwendet werden, die zu den geringsten Beanspruchungen führt und die mit dem Worst-Case-Modell (Kontaktbedingung) abgebildet wurde. Dies ist eine Einschweißtiefe  $t_E$  von ca. 2 – 3 mm, bei einer Nutbreite von ca. 2 mm und einem Winkel  $\alpha$  im Bereich von 15° bis 30°, vgl. Abb. 5. Die Ergebnisse bilden u. a. die Eingangswerte für die experimentellen Schweißversuche.

## 5. Laserstrahlschweißen der Mischverbindung aus Stahl und Aluminium

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zum Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus Stahl S355 ( $t = 5$  mm) und der Aluminiumlegierung EN AW-6082 ( $t = 12$  mm) unter Einsatz der Einschweißtiefenregelungen vorgestellt. Die Wirkung der Einschweißtiefenregelung wird anhand der metallurgischen und mechanischen Eigenschaften der Mischverbindung bewertet.

## 5.1 Entwicklung von Laserstrahlschweißprozessen unter Einsatz eines Einschweistiefenregelungssystems

In vorangegangenen Untersuchungen wurde mit Hilfe der ermittelten Korrelation zwischen Prozessintensität und Einschweistiefe bzw. Schweißgeschwindigkeit die Sollintensität von  $I_p = 28.000$  Counts für eine entsprechende Einschweistiefe von  $t_E = 3,0$  mm unter Verwendung einer Laserstrahlleistung von  $P_L = 6$  kW pro Laserbearbeitungskopf ermittelt, die für die nachfolgenden geregelten Schweißuntersuchungen verwendet wurde. Die beim Schweißen resultierenden Prozess-emissionen bzw. -intensitäten wurden bei einer aluminiumspezifischen Wellenlänge von 396,15 nm erfasst. Für die Schweißnahtgeometrie wurde hinsichtlich der Nut anhand der Ergebnisse der numerischen Simulation eine Nuttiefe von  $t_N = 3,0$  mm, Nutbreite von  $b_N = 2,0$  mm und ein Neigungswinkel von  $\alpha = 15^\circ$  ausgewählt. Der Nutabstand wurde mit einem Wert von  $N_{Ab} = 5$  mm definiert. Zur Erprobung der Funktionalität der entwickelten Inline-Einschweistiefenregelung unter Einsatz des entwickelten Laserbearbeitungskopfs werden eine zu geringe Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,80$  m/min und eine anhand der Korrelation ermittelte Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,92$  m/min, welche der Sollintensität bei Verwendung maximaler Laserstrahlleistung entspricht, gezielt eingestellt. Der Verlauf der Prozessintensitäten beim Laserstrahlschweißen und der mittels Inline Einschweistiefenregelung eingestellten Laserstrahlleistung wird über die Schweißzeit aufgetragen, siehe Abb. 6. Der Verlauf der Prozessintensität für das ungeregelte Schweißen wird im Gegensatz zum geregelten Schweißen lediglich bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,8$  m/min zur Gewährleistung der Übersichtlichkeit gezeigt. Zudem ist die Sollintensität von  $I_p = 28.000$  Counts dargestellt.

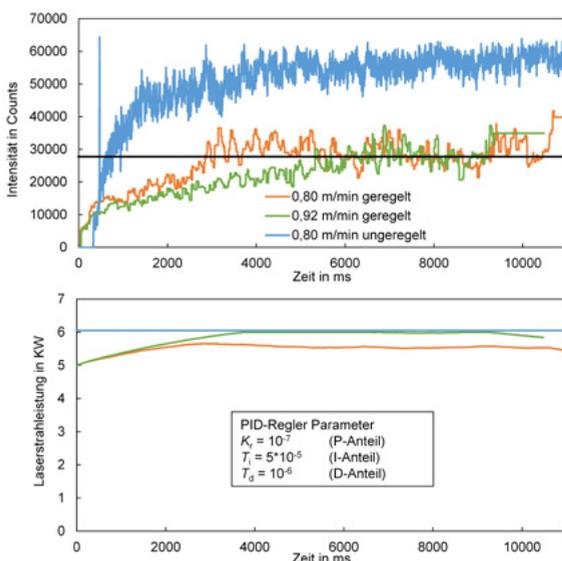


Abb. 6: Verlauf der Prozessintensitäten beim Laserstrahlschweißen und der mittels Inline-Einschweistiefenregelung eingestellten Laserstrahlleistung über die Schweißzeit

Ein sichtbarer Unterschied zwischen der mit Regelung geschweißten Mischverbindung und der ohne Regelung geschweißten Mischverbindung bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,8$  m/min ist in der Ausprägung der Prozessintensität deutlich zu erkennen. Die Regelung trägt dazu bei, dass die Prozessintensität von  $I_p = 28.000$  Counts nahezu eingehalten wird, indem der Laserstrahl auf einen Wert von  $P_L = 5,3$  kW pro Laserstrahlquelle angepasst wird. Die Anpassung ist aufgrund der gleichen Reglerparameter für beide Laserstrahlquellen identisch. Ohne den Einsatz der Regelung ergibt sich eine mittlere Prozessintensität von  $I_p = 55.000$  Counts bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,8$  m/min. Dementsprechend ist aufgrund der höheren Einschweißtiefe eine geringere Schweißnahtqualität zu erwarten. Inwieweit die Einschweißstiefenregelung die Schweißnahteigenschaften und -qualität beeinflusst, ist Gegenstand der nächsten Abschnitte. Wie zu erwarten wird bei der mittels einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,92$  m/min geschweißten Mischverbindung die Sollintensität durch die regelungsbedingte Anpassung der maximal zur Verfügung stehenden Laserstrahlleistung von  $P_L = 6$  kW erreicht, wobei zum Erreichen der Sollintensität im Vergleich zu der mittels  $v_s = 0,80$  m/min geschweißten Mischverbindung mehr Zeit benötigt wird. Grundsätzlich wird beim Schweißen dieser nutzbasierten Methode unabhängig vom Einsatz einer Regelung eine bestimmte Zeit für das Erreichen der Einschweißtiefe benötigt. Dies kann durch die Verwendung von Ein- und Auslaufblechen kompensiert werden.

## **5.2 Einfluss der Einschweißstiefenregelung auf die Schweißnahtgeometrie und das Gefüge**

Inwieweit die Einschweißstiefenregelung die Schweißnahtgeometrie, das Gefüge und die Unregelmäßigkeiten beeinflusst, wird nachfolgend anhand von Querschliffen und der Einschweißstiefenermittlung analysiert. Abb. 7 zeigt den Querschliff einer unregelmäßigen Mischverbindung bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,8$  m/min und Querschliffe von geregelten Mischverbindungen bei einer Schweißgeschwindigkeit  $v_s$  von  $0,80$  m/min und  $0,92$  m/min.

Die Schweißnahtgeometrie der Mischverbindungen ist unabhängig von der Schweißgeschwindigkeit der Form eines Stanzniets ähnlich. Die beiden Einschweißstiefen im Aluminiumblech unterscheiden sich voneinander um einen Wert von etwa  $0,6$  mm, was für ein prozesssicheres Schweißen zu groß ist. Der markante Einfluss der Regelung auf die Schweißnahtgeometrie, insbesondere die Einschweißtiefe, ist anhand der mittels einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,8$  m/min erzeugten Mischverbindungen erkennbar. Dabei resultiert ohne den Einsatz einer Regelung eine Einschweißtiefe von  $t_E = 5,7$  mm. Dagegen wird durch den Einsatz der Einschweißstiefenregelung die angestrebte Einschweißtiefe von etwa  $t_E = 3,0$  mm trotz der geringen Schweißgeschwindigkeit eingehalten. Darüber hinaus kommt es zu keinem markanten Unterschied zwischen den Einschweißstiefen im Quer-

schliff. Die Einhaltung der Einschweißtiefe hat Auswirkungen auf die Bildung von Unregelmäßigkeiten im Querschliff. In den unregelmäßig geschweißten Mischverbindungen mit niedriger Schweißgeschwindigkeit treten große Risse auf. Bei den Rissen handelt es sich um Spannungsrisse, die nach dem Schweißen aufgrund der Gefügeversprödung in Kombination mit den thermisch induzierten Spannungen zunehmend hörbar werden [17]. Eine Reduzierung der Einschweißtiefe auf einen Wert von etwa  $t_E = 3,0$  mm führt zu verringertem konstanten Aluminiumgehalt im Schweißgut von etwa 55 at-% auf 13 at-%, was die Bildung ausgeprägter Risse im Schweißgut durch ein günstigeres Gefüge verhindert. Dementsprechend bedingt die Einschweißtiefenregelung eine signifikante Reduzierung der Risse. Die angestrebte Einschweißtiefe wird ebenso bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_S = 0,92$  m/min mit Hilfe der Regelung gehalten.

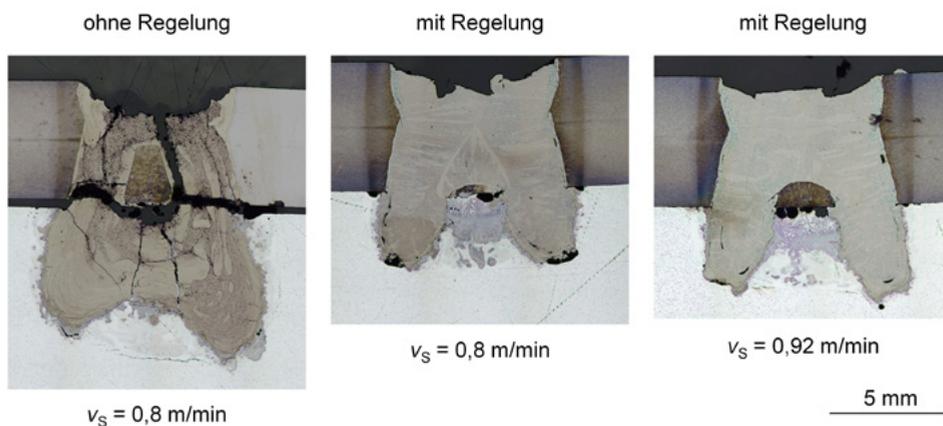


Abb. 7: Querschliff einer unregelmäßigen Mischverbindung bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_S = 0,8$  m/min und Querschliffe von geregelten Mischverbindungen bei einer Schweißgeschwindigkeit  $v_S$  von 0,80 m/min und 0,92 m/min

Der Hinterschnitt hängt bei gleichbleibendem Anstellwinkel hauptsächlich von der Einschweißtiefe ab, sodass sich durch die regelungsbedingte konstante Einschweißtiefe ein nahezu gleichbleibender Hinterschnitt von etwa  $t_H = 0,4$  mm trotz variierender Schweißgeschwindigkeit ergibt. Grundsätzlich führt eine höhere Einschweißtiefe zu einem größeren Hinterschnitt, da der Laserstrahl mehr Material seitlich unter der Oberfläche des Aluminiumblechs aufschmilzt. Aus diesem Grund resultiert bei einer Einschweißtiefe von  $t_E = 5,1$  mm ein Hinterschnitt von nahezu  $t_H = 1$  mm.

### 5.3 Steigerung der Schweisnahtgüte

Basierend auf Erfahrungen und der Literaturrecherche ist bei den Mischverbindungen mit einem Aluminiumanteil von mehr als etwa 10 at-% keine maximale Kraftübertragung zu erwarten. Aufgrund dessen wurde in weiterführenden Untersuchungen unter Berücksichtigung der numerischen Analysenergebnisse die Nutgeometrie mit einem Nutabstand von  $N_{Ab} = 14$  mm, einem Anstellwinkel von  $\alpha = 30^\circ$ , Nuttiefe von  $t_N = 3$  mm und einer Nutbreite von  $b_N = 2,0$  mm mit dem Ziel der Reduzierung des Aluminiumgehalts auf einen Wert unterhalb von 10 at-% optimiert. In der Abb. 8 ist das Ergebnis der weitergeführten Schweißprozessentwicklung dargestellt.



Abb. 8: Querschliff einer Mischverbindung aus dem Stahl S355 und der Aluminiumlegierung EN AW-6082 mit erhöhter Güte

Die Mischverbindung weist die gewünschten Anforderungen, wie eine Einschweißtiefe von  $t_E = 3,0$  mm, einen Hinterschnitt von etwa  $t_H = 0,4$  mm und vor allem ein Gefüge mit einem Aluminiumanteil von 8,5 at-% auf. Inwieweit sich derartige Eigenschaften auf die Verbindungseigenschaften auswirken, wird im nächsten Abschnitt untersucht.

### 5.4 Max. Kopfzugkraft der Mischverbindungen

In der Abb. 9 werden neben der gemittelten max. Kopfzugkraft die exemplarische Bruchart und Flächentopografie unter Einsatz des Rasterelektronenmikroskops (REM) von ungerichtet und gerichtet geschweißten Mischverbindungen bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 0,8$  m/min und der verbesserten Mischverbindung gezeigt.

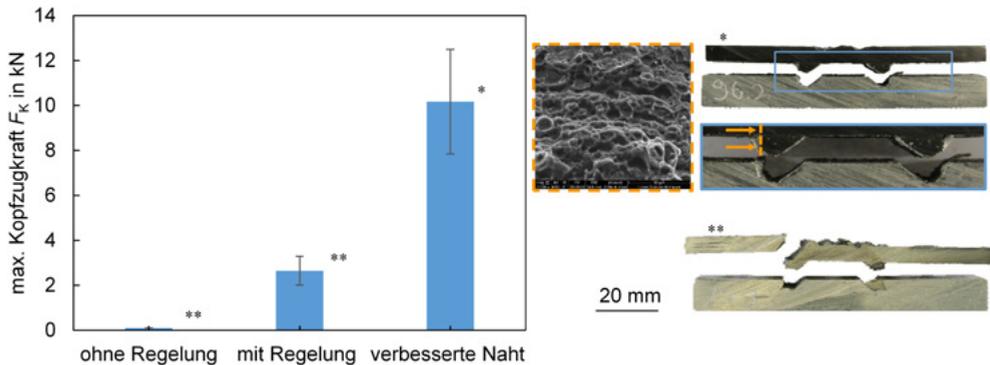


Abb. 9: Gemittelte max. Kopfbzugkraft (links), die exemplarische Bruchart und Bruchflächentopografie unter Einsatz des Rasterelektronenmikroskops (REM) von ungeregelt und geregelt geschweißten Mischverbindungen (rechts) bei einer Schweißgeschwindigkeit von 0,8 m/min und der verbesserten Mischverbindung

Die Einschweißtiefe beeinflusst maßgeblich die Verbindungsfestigkeit bzw. die max. Kopfbzugkraft. Durch die Einhaltung der Einschweißtiefe beim geregelten Laserstrahlschweißen ergibt sich im Vergleich zu der ungeregelt geschweißten Mischverbindung eine signifikant höhere max. Kopfbzugkraft. Nichtsdestotrotz sind die geregelt geschweißten Proben durch einen ungünstigen Aluminiumgehalt von mehr als 13 at-% gekennzeichnet, sodass infolgedessen trotz eines vorhandenen Hinterschnitts die Proben frühzeitig versagen. Die Wirkung des Formschlusses kommt in diesem Fall nicht zur Geltung, da das Versagen vorher im Mischschweißgut stattfindet. Bei der verbesserten Naht mit einem Aluminiumgehalt von etwa 8,5 at-% hingegen werden die höchsten max. Kopfbzugkräfte von etwa  $F_K = 10,2$  kN erreicht. Eine derartige Festigkeit übersteigt die max. Kopfbzugkraft von konventionell laserstrahlgeschweißten Verbindungen von etwa 3,5 kN [17] um etwa 290 %. Das Gefüge im Mischschweißgut zeichnet sich in Folge des geringen Aluminiumgehalts durch eine qualitativ hohe Festigkeit und Verformbarkeit aus. Da die Aluminiumlegierung eine vergleichsweise geringere Festigkeit aufweist, kommt es bei Belastung der Probe zu einem Ausknöpfbuch. Bedingt durch den Hinterschnitt werden Bereiche der Aluminiumlegierung mit herausgerissen. Die Aufnahme der Bruchfläche mittels REM zeigt eine wabenartige Struktur, welche auf ein verformungsfähiges Bruchverhalten hindeutet.

## Verwertung

Für die Werften wurde das hohe Einsatzpotenzial des formschlüssigen Laserstrahlschweißens der Mischverbindung aus Stahl und Aluminiumlegierung für die Anwendung im Schiffbau aufgezeigt. Die entwickelten Schweißprozesse können für die Herstellung der Adapter eingesetzt werden, welche im Vergleich zu den explosionsgeschweißten Adaptern eine größere Freiheit bei der Positionierung der Fügestelle aufweisen können. Daraus ergeben sich Vorteile durch eine

geringere Einschränkung bei gewichts- bzw. schwerpunktkritischen Schiffdesigns. Um die Kosten für die Adapterherstellung möglichst gering zu gestalten, werden die Adapter auf Basis von laserstrahlgeschweißten Halbzeugen aus Aluminium- und Stahlblechen konzipiert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können die Halbzeughersteller ihr Produkt- und Technologieportfolio erweitern, wodurch sich Zugänge zu neuen Marktsegmenten ergeben. Die Grundlage für die Fertigung der Adapter stellt die erfolgreiche Entwicklung des Hochleistungsbearbeitungskopfes mit integrierter Einschweißstiefenregelung auf Basis der spektralen Emissionen und Kurz-Kohärenz-Interferometrie dar. Im Zuge des Verbundprojektes konnte der Tauglichkeitsnachweis beider Einschweißstiefenregelungssysteme zum formschlüssigen Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen im Dickblechbereich erstmals erbracht werden.

### **Zusammenfassung**

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurde die Entwicklung einer innovativen laserstrahlbasierten Schweißmethode zum prozesssicheren, effizienten Fügen von dickwandigen, verformungsfähigen Mischverbindungen aus dem Stahl S355 ( $t = 5 \text{ mm}$ ) und der Aluminiumlegierung ( $t = 12 \text{ mm}$ ) aus dem Schiffbaubereich untersucht. Derartige hybride Kombinationen kommen im Schiffbau bereits zum Einsatz, um werkstoffspezifische Eigenschaften gezielt zur Optimierung der Gewichtsverteilung in Strukturen und Komponenten einzusetzen und zur Senkung des Eigengewichts durch die Umsetzung von Leichtbaukonzepten beizutragen. Dabei wird der Schiffsrumpf aus Stahl und die Aufbauten aus Aluminium gefertigt, die mit Hilfe eines Adapters verbunden werden. Als bewährtes Fügeverfahren für einen solchen Adapter hat sich das Explosionsschweißen durchgesetzt, da die erzeugten flächigen Verbindungen umformbar sind. Diesem Vorteil stehen jedoch die Nachteile hinsichtlich geringer Gestaltungsfreiheit, geringer Festigkeit sowie aufwendiger Herstellung und damit auch Kosten gegenüber, sodass die Nachfrage nach effizienten Alternativen hoch ist. Eine solche Alternative ist durch das Laserstrahlschweißen realisierbar. Jedoch stehen der möglichen Anwendung die begrenzte Verbindungsfestigkeit – insbesondere unter der Kopfzugbelastung – und die geringe Verformungsfähigkeit des Gefüges gegenüber. Die im Forschungsvorhaben entwickelte innovative Schweißmethode ist das nut- und pulverbasierte formschlüssige Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium. Eine sich kreuzende Anordnung der Laserstrahlen führt zu Schweißnähten, die einen Hinterschnitt im unteren Fügepartner erzeugen. Dadurch kommt es zu einer Hinterschneidung von bis zu  $t_H = 0,4 \text{ mm}$  und damit auch zu max. Kopfzugkräften von bis zu  $10,2 \text{ kN}$ , was im Vergleich die max. Kopfzugkraft von konventionell laserstrahlgeschweißten Proben um  $290 \%$  übersteigt. Mit Hilfe eines numerischen Modells konnte die Schweißprozessentwicklung zur Herstellung von vergleichsweise qualitativ hochwertigen Schweißverbindungen zielgerecht durchgeführt werden. Um eine gleichbleibende Schweißnahtqualität zu gewährleisten, wurden

zwei Einschweißtiefenregelungssysteme auf Basis der Analyse der spektralen Prozessemissionen und auf Basis der Kurz-Kohärenz-Interferometrie entwickelt. Beispielsweise konnten durch den Einsatz der spektrometerbasierten Einschweißtiefenregelung die Einschweißtiefe und konsequenterweise die Schweißnahtqualität, trotz variierender Schweißgeschwindigkeit, konstant gehalten werden. Die Grundlage für die Entwicklung des geregelten Laserstrahlschweißens bildet die Entwicklung des Laserbearbeitungskopfs mit adäquatem Beschichtungssystem für die optischen Komponenten im Strahlengang. Anhand der Ergebnisse ist das hohe Einsatzpotenzial der laserstrahlgeschweißten Mischverbindungen für die Anwendung im Schiffbau zu erkennen. Durch die Verwendung laserstrahlgeschweißter Adapter ist eine größere Freiheit bei der Positionierung der Fügestelle zu erwarten. Daraus ergeben sich Vorteile hinsichtlich einer geringeren Einschränkung bei gewichts- bzw. schwerpunktkritischen Schiffdesigns.

### **Danksagung**

Das gesamte Konsortium des Verbundvorhabens dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Verbundvorhabens „Formschlüssiges Laserstrahlschweißen der Mischverbindung aus Stahl und Aluminium für betriebsfeste Halbzeuge im Schiffbau (FOLAMI)“ (FKZ 03SX547) sowie dem Projektträger Jülich (PtJ) für die Projektträgerschaft.

### **Literaturverzeichnis**

- [1] Büdgam, S., Freitag, V., Hahn, O., Ruther, M. (2004) Optimization of joining techniques for multi-material constructions in body making. *ATZ Worldwide* 106, pp. 23 – 27.
  
- [2] Spina, R., Tricarico, L. (2010) Laser welding of aluminium-steel clad materials for naval applications. *Laser Welding*, edited by Stone, X. N. (InTech, Rijeka, Croatia, 2010), pp. 77 – 106.
  
- [3] Meco, S., Ganguly, S., Williams, S., McPherson, N. (2014) Effect of laser processing parameters on the formation of intermetallic compounds in Fe-Al dissimilar welding. *J. Mater. Eng. Perform.* 23, pp. 3361 – 3370.
  
- [4] Noury, P., Hayman, B., McGeorge, D., Weitzenbock, J. (2002) Lightweight Construction for Advanced Shipbuilding – Recent Development. DNV internal report.
  
- [5] Uzun, H., Donne, C. D., Argagnotto, A., Ghidini, T., Gambaro, C. (2005) Friction stir welding of dissimilar Al of 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel. *J. Mater. Des.* 26, pp. 41 – 46.
  
- [6] Chao, R. M., Yang, J. M., Lay, S. R. (1997) Interfacial toughness for the shipboard aluminum/steel structural transition joint. *Marine Structures* 10, pp. 353 – 362.

- [7] Findik, F. (2011) Recent developments in explosive welding. *J. Mater. Des.* 32, pp. 1081 – 1093.
- [8] Acarer, M., Demir, B. (2008) An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum–dual phase steel. *J. Mater. Lett.* 62, pp. 4158 – 4160.
- [9] Wang, P., Chen, X., Pan, Q., Madigan, B., Long, J. (2016) Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 87, p. 3081 – 3090.
- [10] Pohle, C. (1999) Schweißen von Werkstoffkombinationen: metallkundliche und fertigungstechnische Grundlagen sowie Ausführungs-beispiele. DSV-Verlag, Düsseldorf.
- [11] Meco, S., Pardal, G., Ganguly, S., Williams, N., McPherson, N. (2015) Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminum joints for thick structural components. *J. Opt. Lasers Eng.* 67, pp. 22 – 30.
- [12] Kattner, U. R. (1990) Binary Alloy Phase Diagrams. ASM International, Materials Park, OH, USA.
- [13] Hiroaki, O., Schlesinger, M. E., Mueller, E. M. (1992) Alloy Phase Diagrams. 3rd ed. ASM International, Geauga County, OH, USA.
- [14] Torkamany, M. J., Tahamtan, S., Sabbaghzadeh, J. (2010) Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser. *J. Mater. Des.* 31, pp. 458 – 465.
- [15] Behrens, B. A., & Relge, R. (2019) Verbesserung der Duktilität durch Kornfeinung, *wt Werkstattstechnik online*, Jahrgang 109 (2019), H. 10.
- [16] Lahdo, R., Springer, A., Meier, O., Kaierte, S., Overmeyer, L. (2018) Investigations on laser welding of dissimilar joints of steel and aluminium using a high-power diode laser. *J. Laser Appl.* 30, 6/2018.
- [17] Lahdo, R. (2021) Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminiumlegierungen im Dickblechbereich. *Berichte aus dem LZH, 2021, Band 1, TEWISS Verlag.*



# Ein modularer Softsensor für Maritime Pumpen

## Integrierte Betriebspunktermittlung zur Steigerung der Energieeffizienz von Kreiselpumpen auf Basis anpassbarer Komponentenmodelle

### Autorenliste

Dr.-Ing. Sebastian Leonow

Ruhr-Universität Bochum

Qi Zhang, M.Sc.

Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr.-Ing. Martin Mönnigmann

Ruhr-Universität Bochum

### 1. Einleitung

Kreiselpumpen sind für die Bereitstellung von Trinkwasser, den Abwassertransport, aber auch die Feuerlöschsysteme an Bord von Schiffen unabdingbar. Für einen bestimmten Betriebspunkt optimiert können heute Wirkungsgrade von bis zu 94 % erreicht werden [1]. Der Betrieb der Pumpe an ihrem besten Wirkungsgradpunkt ist jedoch nur möglich, wenn ihr aktueller Betriebspunkt bekannt ist. Messtechnik für den Durchfluss, der den Betriebspunkt charakterisiert, ist teuer, wartungsintensiv und in einigen Fällen unmöglich in eine bestehende Anlage einzubauen [2, 3]. Es resultieren Anwendungen, in denen Pumpen, die, obwohl sie konstruktionsbedingt prinzipiell einen hohen Wirkungsgrad aufweisen, mit niedriger Energieeffizienz betrieben werden, da der Betriebszustand aufgrund fehlender Messungen nicht bekannt ist.

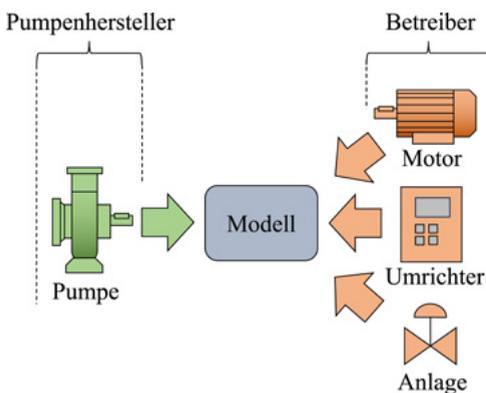


Abb. 1:  
Pumpenhersteller und Betreiber liefern unabhängig voneinander Parameter für das mathematisch-physikalische Pumpensystemmodell (Abbildung reproduziert und übersetzt nach [4]).

Eine Alternative zur teuren Messtechnik stellen Softsensoren dar, die in der Regel nur einfach zu erfassende Messungen und ein mathematisch-physikalisches Systemmodell benötigen, um den Betriebspunkt oder die Parameter einer Anlage zu ermitteln [5, 6]. Während im akademischen Bereich zahlreiche Ergebnisse aus Labor- und Feldtests von Softsensoren mit unterschiedlichen Ansätzen verfügbar sind [7–9], ist die kommerzielle Verfügbarkeit von einsatzbereiten Softsensoren, bis auf wenige Einzelfälle, hauptsächlich von großen Pumpenherstellern [10], beschränkt. Einer der wichtigsten Faktoren für diese Diskrepanz zwischen Labor- und Praxisanwendungen ist die inhomogene Beschaffenheit von realen Pumpensystemen, bei denen Pumpe und elektrischer Antrieb in der Regel von verschiedenen Herstellern stammen und mitunter erst in der Schiffswerkstatt zusammengebaut werden (vgl. Abb. 1).

Folglich kann der Pumpenhersteller, der in der Regel den Softsensor anbietet und parametriert, keine genauen Modelle für Motor und erst recht nicht für die umgebende Anlage berücksichtigen. Die daraus resultierende Diskrepanz zwischen Modell und Realität kann zu einer erheblichen Ungenauigkeit des Softsensors führen, die eine vollständige Neuauslegung erfordern würde, insbesondere wenn ein datengetriebenes Modell verwendet wird. Diese Neuauslegung kann in der Regel nicht vom Betreiber der Pumpe vorgenommen werden, da es ihm an Ausrüstung und Know-how fehlt.

Zur Lösung der beschriebenen Problematik soll im Folgenden ein Komponentenmodell entwickelt werden, das einerseits eine hohe Genauigkeit erzielt, andererseits eine möglichst einfache Parametrierung durch den Betreiber erlaubt und damit die Basis für einen im Betrieb anpassbaren Softsensor darstellt. Der vorliegende Artikel ist eine Erweiterung des englischsprachigen Konferenzbeitrages [4].

## **2. Komponentenmodell**

Die Komponenten eines typischen Pumpensystems sind in Abb. 1 dargestellt. Die daraus abgeleitete Modellstruktur in Abb. 2 wurde für eine hohe Übertragbarkeit auf typische maritime Pumpensysteme entworfen. Der Eingang in das Modell ist der Frequenzsollwert  $f$ , der die Amplitude und Frequenz der dem Motor zugeführten Spannung  $U$  bestimmt. Die Frequenz ist damit der primäre Steuereingang des Pumpensystems.

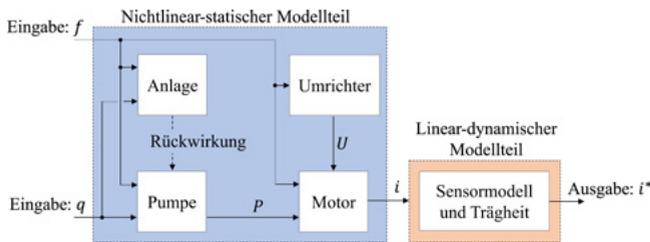


Abb. 2: Die gewählte Modellstruktur bildet die Schnittstellen und Beziehungen zwischen den Komponenten realer Pumpensysteme nach [4].

Der Motorstrom  $i$  dient als primäre Messung für den Softsensor und ist in der Regel ohne zusätzliche Sensorik verfügbar, da Umrichter den Motorstrom überwachen und über eine Schnittstelle ausgeben.

Der Motor ist fest mit der Pumpe gekuppelt, so dass Drehmoment  $M$ , Drehzahl  $n$  und die resultierende mechanische Leistung  $P$  für Pumpe und Motor gleich sind. Der hier vorgestellte Ansatz berücksichtigt auch die Rückwirkungen der Anlage, um die Leistung des Softsensors gegenüber bisherigen Ansätzen zu verbessern (siehe Abschnitt 2.4 und Abb. 6).

## 2.1 Umrichter und Sensorik

Im einfachsten Betriebsmodus erhält der Umrichter den Frequenzsollwert, z. B. von einer externen Steuerung, und liefert elektrischen Strom mit der gewünschten Frequenz an den Motor. Die Ausgangsspannung  $U$  hängt von der Frequenz  $f$  ab und wird in den Umrichterparametern festgelegt. Typische Funktionen  $U(f)$  sind linear oder quadratisch und werden anhand der Charakteristik der an den Motor angeschlossenen Maschine gewählt. Der Drehmomentbedarf von Pumpen wird oft mit Hilfe einer quadratischen Funktion

$$U(f) = U_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \quad (1)$$

modelliert, dabei bezeichnen  $U_0$  und  $f_0$  die Netzspannung und die Netzfrequenz. Wir blenden den Fall der nicht-quadratischen  $U(f)$ -Funktionen hier aus, weisen aber darauf hin, dass die entsprechenden Parameter in der Regel leicht über die Dokumentation und die Bedienoberfläche des Umrichters ermittelt werden können.

Der Umrichter dient gleichzeitig als Messgerät für den Motorstrom. Je nach Umrichter wird dabei der Gesamtstrom oder der tatsächliche Wirkstrom gemessen, worauf in Abschnitt 2.2 näher eingegangen wird. Unabhängig von der Art der Messung wird eine Tiefpassfilterung des Messwertes vorgenommen, die häufig die dominante Verzögerung im Gesamtsystem darstellt:

$$\frac{di^*(t)}{dt} = -\frac{1}{T_c} \cdot i^*(t) + \frac{1}{T_c} \cdot i(t). \quad (2)$$

Dabei ergibt sich  $i(t)$  aus den übrigen Modell-Komponenten (siehe Abschnitt 2.2) und  $i^*(t)$  stellt den gemessenen Strom dar. Der Parameter  $T_c$  in (2) enthält die kombinierte Verzögerungszeit der Reaktion von  $i^*(t)$  auf eine Änderung von  $i(t)$  bzw.  $f(t)$  und kann aus einer Messung der Sprungantwort ermittelt oder gleich der Filterzeitkonstante des Umrichters gesetzt werden. Für große Pumpen mit einer erheblichen Trägheit der rotierenden Komponenten kann ein aufwendigeres Modell erforderlich sein [7].

## 2.2 Motor

Es wird ein Asynchronmotor mit Käfigläufer angenommen, da dies der mit Abstand häufigste Antrieb für Pumpen ist. Im Folgenden werden zunächst einige Motorparameter für etablierte stationäre Modelle eingeführt, aus denen schließlich ein vereinfachtes, leichter zu parametrisierendes Modell abgeleitet werden kann. Die Indizes 1 und 2 verweisen auf Stator und Rotor,  $R$  und  $L$  bezeichnen den Widerstand bzw. die Induktivität der Motorwicklungen.  $L_M$  beschreibt die gegenseitige Induktivität.  $z$  ist die Anzahl der Polpaare und der Streukoeffizient ist definiert als  $\sigma = 1 - L_M^2(L_1L_2)^{-1}$  (siehe z. B. [11]).

Die mechanische Nennleistung  $P_0$  markiert den Auslegungsarbeitspunkt. Wir betrachten im Folgenden  $0.5P_0 < P < 1.5P_0$  als normalen Betriebsbereich.

Nach [11] sind Drehmoment  $M$  und Strom  $i$  eines Asynchronmotors im stationären Zustand

$$M = k_M \cdot \frac{U^2}{f^2} \cdot \frac{s \cdot s_B}{s_B^2 + s^2}, \quad (3)$$

$$i = k_i \cdot (-j) \cdot \frac{U}{f} \cdot \frac{\sigma \cdot s_B + js}{s_B + js}, \quad (4)$$

darin ist  $s = (f - n z_p 60^{-1}) / f$  der Motorschlupf,  $s_B = R_2 / (f \sigma L_2)$  der Kippschlupf und  $k_i = (\sigma L)^{-1}$  eine Konstante. Der Faktor  $k_M = 2M_B$  in (3) enthält das Kippmoment  $M_B$ . Das Kippmoment skaliert mit  $(U/f)^2$  und ist ansonsten für einen gegebenen Motor konstant:

$$M_B = \frac{3}{4} \cdot z_p \cdot \frac{L_M^2}{\sigma L_1^2 L_2}.$$

Die primäre Kopplungsgröße zwischen Motor und Pumpe ist die mechanische Leistung  $P=M \cdot n \cdot \pi (30)^{-1}$ , die mit  $n=(1-s)f \cdot 60 \cdot (z_p)^{-1}$  und (3) ausgedrückt werden kann über

$$P = k_p \cdot \frac{U^2}{f^2} \cdot \frac{s(1-s)}{s_B^2 + s^2}, \quad (5)$$

wobei  $k_p=M_B \cdot (3600\pi R_2) \cdot (z_p \sigma L_2)^{-1}$  konstant ist. Nach  $s$  aufgelöst ergibt sich

$$s = \pm \frac{\sqrt{-4s_B^2 \tilde{P}^2 - 4s_B^2 \tilde{P} + 1} \pm 1}{2(\tilde{P} + 1)} \quad \text{mit } \tilde{P} = \frac{P}{k_p} \cdot \frac{f^2}{U^2}. \quad (6)$$

Der komplexwertige Motorstrom  $i$  in (4) beinhaltet Wirk- und Blindstromanteile und es hängt vom Umrichter ab, wie diese gemessen werden (siehe Abschnitt 2.1). Wenn der Umrichter den Wirkstrom misst, d. h.  $\Re(i)$ , vereinfacht sich (4) zu

$$\Re(i) = k_i' \cdot \frac{U}{f^2} \cdot \frac{s}{\underbrace{s_B^2 + s^2}_{i_R}}, \quad (7)$$

mit der Konstante  $k_i' = \frac{R_2(1-\sigma)}{\sigma^2 L_1 L_2}$ .

Für den Fall, dass der Gesamtstrom  $|i|$  gemessen wird, wird (4) zu

$$|i| = k_i'' \cdot \frac{U}{f^2} \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{\sigma^2 + s^2/s_B^2}{s_B^2 + s^2}}}_{i_A}, \quad (8)$$

mit der Konstante  $k_i'' = \frac{R_2}{\sigma^2 L_1 L}$ .

Wird  $s$  aus (6) in  $i_R$  in (7) und  $i_A$  in (8) eingesetzt, ergibt sich die Abbildung  $P \rightarrow i$  für gegebene  $U$  und  $f$ . Die Form dieser Abbildung hängt nur von  $s_B$  und  $\sigma$  ab, da alle übrigen Terme in (6), (7) und (8) von  $P$  unabhängige, konstante Skalierungsfaktoren sind. Dies erlaubt eine allgemeine Aussage über die Nichtlinearität von  $s_B$  und  $\sigma$ . Nach [12] ist das relative Nichtlinearitätsmaß, das die Güte einer optimalen linearen Approximation  $y=a \cdot x+b$  einer nichtlinearen Funktion  $f(x)$  nach der Methode der kleinsten Quadrate quantifiziert,

$$\lambda = \frac{\sqrt{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} (f(x) - a \cdot x - b)^2 dx}}{(\max(f(x)) - \min(f(x))) \sqrt{x_{\max} - x_{\min}}}$$

über einem Intervall  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ . Die Anwendung von (9) auf (7) und (8) führt zu den in Abb. 3 dargestellten Ergebnissen, wobei typische Bereiche für  $s_B \in (0, 0.3)$  und  $\sigma \in (0.1, 0.5)$  gewählt und  $s$  im nominalen Betriebsbereich zwischen  $0.25s_B$  und  $0.5s_B$  variiert wurde.

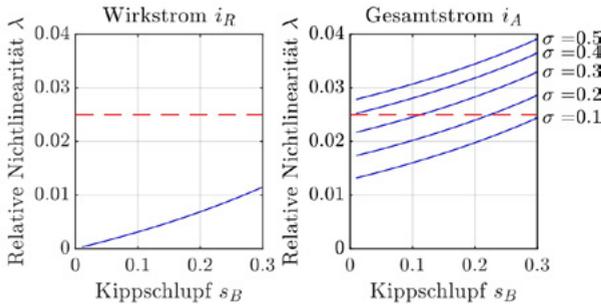


Abb. 3: Die blauen Kurven zeigen die Anwendung von (9) auf  $i_R$  aus (7) und  $i_A$  aus (8), ausgewertet über  $s_B$ . Die rote gestrichelte Linie zeigt eine relative Nichtlinearität von 2.5% an, die nach [12] die Grenze für eine ausreichend genaue lineare Approximation darstellt [4].

Offensichtlich zeigt  $i_R$  ein nahezu lineares Verhalten und liegt deutlich unterhalb der von [12] vorgeschlagenen Grenze der Nichtlinearität von 2.5%. Für  $i_A$  zeigt sich eine stärkere Nichtlinearität, insbesondere für größere Werte von  $\sigma$ . Aus einer Analyse mit Motorparametern aus verschiedenen Quellen [11, 13, 14] im Leistungsbereich von 0.75 kW bis 180 kW lässt sich auf eine sinnvolle Begrenzung von  $\sigma, s_B < 0.18$  schließen, was den linearen Modellierungsansatz auch für  $i_A$  stützt. Für bestimmte Motoren kann hier ein aufwendigerer Ansatz erforderlich sein.

Abb. 4 zeigt  $\Re(i)$  und  $|i|$  über  $P$ , die sich durch Einfügen von (6) in (7) bzw. (8) für Parameter eines typischen Motors (Daten aus [11]) ergeben. Der Ruhestrom  $\Re(i(P=0))$  ist entweder 0, da  $i_R(0)=0$ , während  $|i(P=0)|$  mit  $U$  skaliert, da  $i_A(0)=\sigma$ .

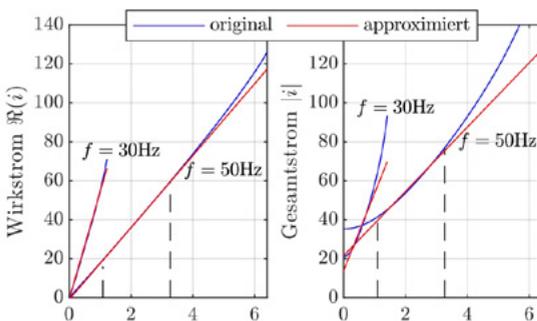


Abb. 4: Die blauen Kurven stellen  $\Re(i)$  und  $|i|$  über  $P$  dar und ergeben sich aus (6), (7) und (8), für zwei Situationen mit  $f = 50 \text{ Hz}, U = 380 \text{ V}$ , bzw.  $f = 30 \text{ Hz}, U = 137 \text{ V}$ . Die roten Linien zeigen die besten linearen Approximationen im Betriebsbereich  $0.5 P_0 < P < 1.5 P_0$  [4].

Sowohl  $\Re(i)$  als auch  $|i|$  zeigen eine ausreichend lineare Form im Nennbetriebsbereich. Die relative Nichtlinearität (9) beträgt 0.2% für  $\Re(i)$  und 2.1% für  $|i|$ , also deutlich unter 2.5%. Die Steigung der linearen Approximation skaliert mit  $1/U$ , was direkt aus dem Einfluss von  $U$  und  $f$  folgt, der in (6), (7) und (8) impliziert ist. Ein zentrales Ergebnis ist hier, dass keiner der Motorparameter die durch  $U$  und  $f$  implizierte Skalierung beeinflusst, diese also unabhängig vom konkreten Motor und damit leicht übertragbar ist.

Als Folge der obigen Beobachtungen kann ein universelles lineares Modell

$$i(U, P) = b_{i,0} \cdot \frac{U}{U_0} + m_{i,0} \cdot \frac{U_0}{U} \cdot P \quad (10)$$

angesetzt werden, wobei der Ruhestrom  $b_{i,0}$  und die Steigung  $m_{i,0}$  dem Nennbetrieb bei  $f_0$  entsprechen und durch eine einfache Messung des Stroms, durch Kenndaten aus dem Wartungshandbuch, oder letztlich sogar durch Verwendung des Datenblatts oder Motortypschildes parametrisiert werden können.

### 2.3 Pumpe

Die hier durchgeführte Aufteilung der Teilmodelle hat die Systemgrenzen derart definiert, dass der rein hydraulische Teil des Modells weitgehend unabhängig ist von Einflüssen aus der Anlage, so dass eine Parametrierung durch den Pumpenhersteller erfolgen kann. Mit den Daten für die Kennlinie  $q \rightarrow P$  bei Nennfrequenz  $f_0$  und den hydraulischen Ähnlichkeitsgesetzen [15, S. 134] kann ein Polynomansatz Überzählige (11)

$$P(f, q) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^3 \cdot \frac{\eta_p(f)}{\eta_{p,0}} \cdot \sum_{k=1}^m \left( c_{p,k} \cdot \left( q \cdot \frac{f_0}{f} \right)^k \right) \quad (11)$$

gewählt werden, der  $P$  in Abhängigkeit von  $q$  für variable Frequenzen  $f$  beschreibt, wobei die erforderliche Polynomordnung  $m$  von der Komplexität der Pumpencharakteristik  $q \rightarrow P$  abhängt und  $c_{p,k}$  die entsprechenden Polynomkoeffizienten sind. Die Parametrierung der Wirkungsgradfunktion  $\eta_p(f)$  erfordert eine zusätzliche Messung für verschiedene Frequenzen  $f$ , die z. B. in einer polynomiellen oder stückweise linearen Funktion abgebildet wird. Es ist davon auszugehen, dass  $\eta_p(f)$  vom Pumpenhersteller leicht parametrisiert werden kann, z. B. während einer routinemäßigen Abnahmemessung auf einem Pumpenprüfstand.

Es ist zentral, dass in (11) der Frequenzsollwert  $f$  des Umrichters anstelle der tatsächlichen Drehzahl  $n$  verwendet wird, da  $n$  normalerweise nicht gemessen

wird. Es kann angenommen werden, dass der Schlupf  $s$ , d. h. der Fehler, der durch das Ersetzen von  $n$  durch  $f$  entsteht, bei angemessener Auslegung des Pumpensystems in der Anlage ähnlich ausgeprägt ist wie bei der Prüfstandsmessung. Der Einfluss ist daher bereits in  $\eta_p(f)$  enthalten.

## 2.4 Anlage

Die Anlage stellt den unsichersten Teil des Entwurfsprozesses eines Softsensors dar, da der tatsächliche Aufbau des hydraulischen Prozesses vor Ort dem Pumpenhersteller in der Regel nicht bekannt ist. Eine isolierte Modellierung der Pumpe wird außerdem zu einem gewissen Grad durch die Theorie gestützt, die eine Ermittlung von  $q$  auf der Grundlage von bekannten  $n$  und  $i$  ermöglicht, ohne den umgebenden Prozess mit Ausnahme seines offensichtlichen Einflusses auf  $q$  zu berücksichtigen. In der realen Anwendung führen sekundäre Effekte wie Einlasswirbel oder Kavitation zu einer erheblichen Veränderung der Pumpeneigenschaften [15, 16], die, wenn sie nicht berücksichtigt werden, die Genauigkeit des Softsensors erheblich reduzieren können.

Die Erfassung der Anlagenrückwirkung in vollem Umfang ist aufwändig und erfordert in der Regel eine fallspezifische, detaillierte Modellierung, wie sie z. B. in [16] durchgeführt wurde, jedoch weder vom Pumpenhersteller noch vom Betreiber geleistet werden kann.

Entsprechend kann kein allgemeines Modell für die Anlagenrückwirkung erstellt werden. Für einige Teileffekte ist dies jedoch möglich. Es soll daher hier auf den häufigen Effekt der Kavitation eingegangen werden, der z. B. durch unterdimensionierte Rohrleitungen oder ungünstige Betriebspunkte entsteht. Kavitation führt in der Regel zu einem plötzlichen Abfall des Leistungsbedarfs der Pumpe, da die für Kavitation maßgebliche Dampfblasenbildung am Laufrad zu einer lokalen Reduktion der Dichte des Fluids führt. Es soll hier ein heuristisches Modell vorgeschlagen werden, das auf Beobachtungen an mehreren Pumpen und Ergebnissen aus der Literatur [17, 18] basiert und eine korrigierte Pumpenleistung  $P^*=P^-$  ergibt, wobei  $P$  sich aus dem Pumpenmodell (11) ergibt und

$$P^- = P_{cav} \frac{f^3 \eta_P}{f_0^3 \eta_{P,0}} \left( 1 + \tanh \left( \left( q \sqrt{\frac{f_0}{f}} - q_{cav} \right) c_{cav} \right) \right) \quad (12)$$

den Einfluss der Kavitation auf die Leistung beschreibt. In (12) ist  $P_{cav}$  der Durchfluss bei gerade einsetzender Kavitation und  $P_{cav}$  die diesem Betriebspunkt entsprechende Leistung  $P$ . Der Faktor  $c_{cav} \ll 1$  skaliert das Einsetzen des Kavitationseffekts, wobei kleinere Werte zu einem sanfteren Einsetzen führen.

### 3. Parameterermittlung und Modellqualität

Die Parametrierung der Teilmodelle aus den Abschnitten 2.1 bis 2.4 kann separat erfolgen. Hier sollen exemplarisch Prüfstands- und Datenblattinformationen für eine 7.5 kW-Normpumpe in einem Hydraulikprüfstand (Abb. 5) genutzt werden. Für den Umrichter können die Parameter  $U_0=380\text{ V}$ ,  $f_0=50\text{ Hz}$ , die  $U/f$ -Kurve und die Filterzeitkonstante  $T_c=0.5$  über die Bedienoberfläche ermittelt werden. Aus dem Datenblatt folgt, dass der Umrichter den Gesamtstrom  $|i|$  misst. Der Einfachheit halber wird im Folgenden  $i$  für  $|i|$  verwendet.

Das Motormodell (10) benötigt den Ruhestrom  $b_{(i,0)}$  und die Steigung  $m_{(i,0)}$  des Stroms über  $P$ . Der Ruhestrom  $b_{(i,0)}=2.3\text{ A}$  wurde hier aus einem Leerlauftest gewonnen. Die Stromsteilheit kann dem Motordatenblatt entnommen werden, da hier die Nennleistung  $P_{\text{Nenn}}=7.5\text{ kW}$  und der Nennstrom  $i_{\text{Nenn}}=14\text{ A}$  gegeben sind, woraus sich  $m_{(i,0)}=(i_{\text{Nenn}}-b_{(i,0)})/P_{\text{Nenn}}=0.0016\text{ A/W}$  ergibt. Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der kombinierten Umrichter- und Motormodelle im oberen linken Diagramm im Vergleich zu den Prüfstandsmessungen. Die Modellgenauigkeit ist für alle dargestellten Frequenzen und über den gesamten gemessenen Leistungsbereich ausreichend, was durch den niedrigsten mittleren quadratischen Fehler (RMSE) von 0.1 A für 50 Hz und den höchsten RMSE-Wert von 0.34 A für 20 Hz, was 2.5 % im Vergleich zum Nennstrom  $i_{\text{Nenn}}=14\text{ A}$  entspricht, bestätigt wird. Die Ergebnisse stützen den in Abschnitt 2.2 vorgeschlagenen linearen Modellierungsansatz.

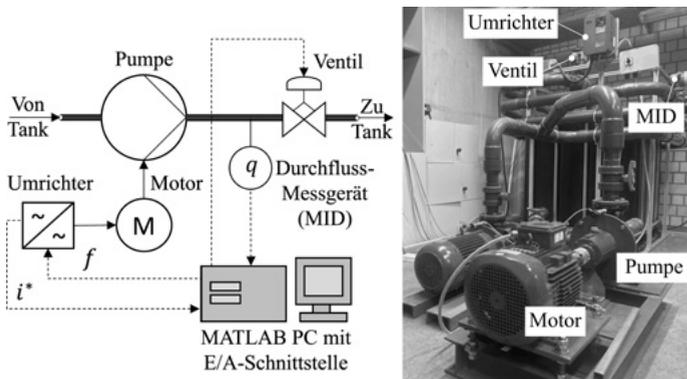


Abb. 5: Prüfstand mit 7.5kW Normpumpe und magnetisch-induktivem Durchfluss-Messgerät (MID) zur Validierung des Softsensors [4].

Der polynomielle Teil des Pumpenmodells (11) konnte anhand des vom Hersteller bereitgestellten Datenblatts parametrierung werden, das die  $q \rightarrow P$ -Kennlinie für den Nennbetrieb bei  $f_0=50\text{ Hz}$  enthält. Es wurde ein Polynom 4. Ordnung gewählt, das als schwarze Kurve im oberen rechten Diagramm in Abb. 6 dargestellt ist. Der Wirkungsgrad  $\eta_p(f)$  wurde am Prüfstand durch Vergleich des Modells mit dem gemessenen  $P$  für die Frequenzen 20 Hz bis 50 Hz bei  $q=0\text{ m}^3/\text{h}$  ermittelt, wobei

sich ein abnehmender Wirkungsgrad von  $\eta_p(50)/\eta_{p,0}=0.98$  für 50 Hz bis  $\eta_p(20)/\eta_{p,0}=0.64$  für 20 Hz ergab. Wie bereits in Abschnitt 2.3 diskutiert, enthält  $\eta_p(f)$  auch den Unterschied im Motorschlupf zwischen der Datenblattmessung und der Prüfstandsmessung, was zu dem unerwarteten Nennwirkungsgrad  $\eta_p(50)/\eta_{p,0} \neq 1$  führt.

Das Kavitationsmodell benötigt eine einzelne Prüfstandsmessung bei 50 Hz mit einem manuell eingestellten Durchfluss, der zum Einsetzen der Kavitation führt. Im vorliegenden Fall ist dieser Betriebspunkt bei  $q_{cav} \approx 60 \text{ m}^3/\text{h}$  und einem zugehörigen  $P_{cav}=5.5 \text{ kW}$ . Aus einem Vergleich der Modellergebnisse mit dem gemessenen  $P$  konnte  $c_{cav}=0.1$  manuell angepasst werden.

In Abb. 6 sind die Ergebnisse des kombinierten Pumpen- und Kavitationsmodells im oberen rechten Diagramm dargestellt, wobei eine ausreichende Genauigkeit erkennbar ist. Bemerkenswert ist der signifikante Unterschied zwischen der Datenblatt-Kennlinie (schwarze Kurve) und dem gemessenen  $P$  (in blau), der bei Vernachlässigung des Anlageneinflusses zu einem signifikanten Modellfehler führen würde. Das kombinierte Pumpen- und Kavitationsmodell ergibt den höchsten RMSE-Wert von 76.5 W für 50 Hz und den niedrigsten RMSE-Wert von 58.6 W für 20 Hz. Verglichen mit der maximalen Leistung  $P_{cav}$  je Frequenz liegt der relative RMSE-Wert unter 5 % für 30 Hz bis 50 Hz, steigt aber auf 13.5 % für 20 Hz. Eine weitere Abstimmung von  $\eta_p(f)$  kann diesen relativen Fehler verringern, erfordert aber auch aufwändigere Messungen. Wir belassen  $\eta_p(f)$  hier und bewerten die Auswirkungen der Modellfehler auf die Leistung des Softsensors im folgenden Abschnitt.

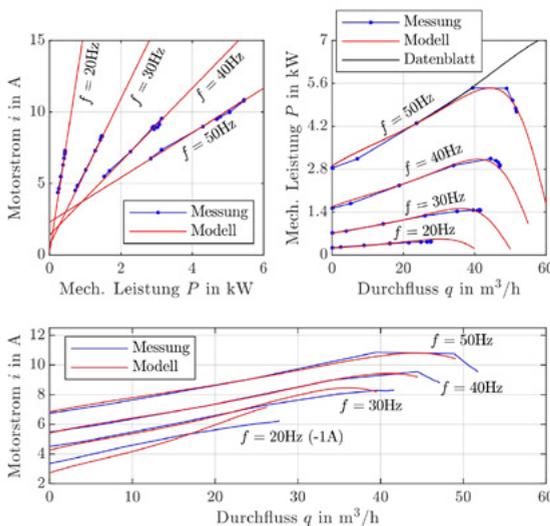


Abb. 6: Gegenüberstellung der kombinierten Teilmodelle mit Messdaten. Oben links: Umrichter und Motor  $(P,f) \rightarrow i$ . Oben rechts: Pumpe und Anlage  $(q,f) \rightarrow P$ . Unten: Nichtlinear-statisches Gesamtmodell  $(q,f) \rightarrow i$  [4].

Das untere Diagramm in Abb. 6 zeigt das vollständige Modell des Pumpensystems, d.h. die Kombination von (1), (10), (11) und (12). Der Fehler wird bei niedrigeren Frequenzen größer, was auf den großen Gradienten in der  $P \rightarrow i$ -Kennlinie zurückzuführen ist (vgl. Abb. 6 oben links). Der RMSE-Wert ist bei 1.46 % für 50 Hz am niedrigsten und bei 5.87 % für 20 Hz am höchsten, verglichen mit  $i_{Nenn} = 14A$ . Die erreichte Genauigkeit wird in den folgenden Abschnitten 4 und 5 weiter diskutiert.

#### 4. Softsensor

Für den Softsensor wird ein Unscented Kalmanfilter (UKF) [19] als grundlegende Algorithmik gewählt. Das in den vorangegangenen Abschnitten skizzierte Modell wird in ein Zustandsraummodell umgewandelt

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \frac{1}{T_c} \cdot \left[ -x_i(t) + i \underbrace{\left( \frac{(1)}{\widehat{U}(f)}, \frac{(11)}{P(f, x_q)} - \frac{(12)}{P^-(f, x_q)} \right)}_{(10)} \right], \quad \frac{dx_q(t)}{dt} = 0 \quad (13)$$

und

$$y(t) = i^*(t) = x_i(t), \quad \hat{q}(t) = x_q(t)$$

mit erweitertem Zustandsvektor  $x = (x_i, x_q)^T$ , wobei  $x_q$  dem vom Softsensor ermittelten Durchfluss  $\hat{q}$  entspricht und  $q$  in den Zustandsgleichungen (13) ersetzt. Der erweiterte Zustand  $x_q$  wird durch das Kalmanfilter entsprechend angepasst, um Konvergenz von  $y(t)$  und gemessenem  $i(t)$  zu erreichen. Die primären Tuningparameter des Kalmanfilters wurden zu

$$Q = \begin{pmatrix} 0,05 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix}, \quad r = 2 \quad (14)$$

gewählt, während alle übrigen Parameter wie in [20] eingestellt wurden. Die Aktualisierung des Zustands über die Zustandsgleichung (13) wird zeitlich diskretisiert mit dem Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung [21] mit der Abtastrate  $T_s = 0.1$  Sekunden durchgeführt, was der Abtastrate der Messeinrichtung entspricht.

Abb. 7 zeigt die Ergebnisse eines Testlaufs des UKF in der Anlage aus Abb. 5..

Das obere Diagramm zeigt die primäre Größe  $i$ , der der Softsensor folgt, während das mittlere Diagramm den durch den Softsensor ermittelten Durchfluss  $q$  darstellt. Das untere Diagramm zeigt die Frequenz  $f$ , die während des aufgezeichneten Intervalls mehrmals verändert wurde. Die Ventilöffnung (vgl. Abb. 5) wurde während des Messintervalls ebenfalls verändert, um den Durchflusswiderstand strom-

abwärts zu variieren. Die Änderung der Ventilöffnung wurde technisch bedingt nicht aufgezeichnet, ist aber aus der Änderung des Durchflusses ersichtlich.

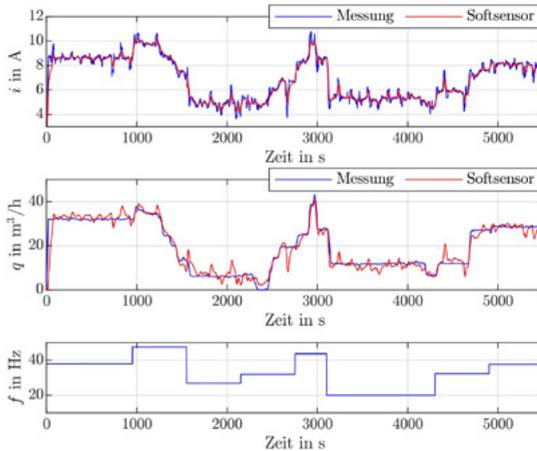


Abb. 7: Testlauf des Softsensors am Prüfstand [4].

Das gemessene  $i$  zeigt ein erhebliches Messrauschen, das sich weniger in der Standardabweichung von 0.316 A, sondern in einem hohen Spitzenwert von 1.63 A zeigt. Das Tuning (14) wurde im Hinblick auf dieses Rauschen gewählt und stellt einen Kompromiss zwischen Rauschunterdrückung und Agilität der ermittelten Durchflussgröße  $q$  dar.

Das resultierende  $\hat{q}$  folgt dem tatsächlichen Durchfluss gut, auch während des transienten Betriebs. Ein gewisses Restrauschen ist in  $\hat{q}$  vorhanden, was aus dem erwähnten Kompromiss beim Tuning resultiert. Der RMSE-Wert über die gesamte Zeitreihe beträgt 2.86 m<sup>3</sup>/h oder 4.76 %, bezogen auf  $q_{cav} = 60$  m<sup>3</sup>/h, d.h. die maximal zulässige Durchflussmenge vor Einsetzen der Kavitation.

### Fazit

Wir haben einen vereinfachten Modellierungsansatz für ein Kreiselpumpen- und Motorsystem skizziert und in einer Durchfluss-Softsensor-Anwendung bewertet. Der Softsensor ist weniger genau als ein moderner Hardware-Sensor, bei dem üblicherweise Abweichungen von  $\pm 1\%$  oder weniger garantiert werden. Die erreichte Genauigkeit genügt aber durchaus, um Regelungs- und Effizienzsteigerungsmaßnahmen durchzuführen und die Ergebnisse stützen den vereinfachten Modellierungsansatz. Mit dem erfolgreich validierten Softsensor wurde der Grundstein für die darauf aufbauende Arbeiten zur Digitalisierung maritimer Pumpen und damit die Voraussetzung für Effizienzsteigerungsmaßnahmen geschaffen. Das an vielen Stellen mit Bedacht verallgemeinerte Modell wird in zukünftigen Versuchen auf seine Übertragbarkeit auf verschiedene Pumpensysteme untersucht und validiert.

## Literatur

- [1] Jim Elsey, How to Define and Measure Centrifugal Pump Efficiency: Part 1.
- [2] R. Doraiswami und L. Cheded, „Robust model-based soft sensor: Design and application,“ IFAC Proceedings Volumes, Jg. 47, Nr. 3, S. 5491–5496, 2014.
- [3] D. Martin, N. Kühl und G. Satzger, „Virtual sensors,“ Business & Information Systems Engineering, Jg. 63, S. 315–323, 2021.
- [4] S. Leonow, Q. Zhang und M. Mönnigmann, „A Modular Soft Sensor for Centrifugal Pumps,“ IFAC-PapersOnLine, Jg. 58, Nr. 14, S. 91–96, 2024.
- [5] D. Wang, J. Liu und R. Srinivasan, „Data-driven soft sensor approach for quality prediction in a refining process,“ IEEE Transactions on Industrial Informatics, Jg. 6, Nr. 1, S. 11–17, 2009.
- [6] S. Leonow und M. Mönnigmann, „Soft sensor based dynamic flow rate estimation in low speed radial pumps,“ in European Control Conference 2013, Zurich, 2013, S. 778–783.
- [7] S. Leonow und M. Mönnigmann, „Operating point estimation in hydraulic turbomachines with non-invertible characteristics,“ in Proceedings of the European Control Conference 2016 (ECC16), Aalborg, 2016, S. 2381–2385.
- [8] R. P. G. Lima, J. M. Mauricio Villanueva, H. P. Gomes und T. K. S. Flores, „Development of a Soft Sensor for Flow Estimation in Water Supply Systems Using Artificial Neural Networks,“ Sensors, Jg. 22, Nr. 8, S. 3084, 2022.
- [9] Y. Wu, D. Wu, M. Fei, H. Sørensen, Y. Ren und J. Mou, „Application of GA-BPNN on estimating the flow rate of a centrifugal pump,“ Engineering Applications of Artificial Intelligence, Jg. 119, S. 105738, 2023.
- [10] C. P. Pauly, „Sensing down to the operating point,“ World Pumps, Jg. 2011, Nr. 9, S. 32–35, 2011.
- [11] D. Schröder, Fundamentals of Electrical Drives (in German) (Springer-Lehrbuch). Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [12] K. Emancipator und M. H. Kroll, „A quantitative measure of nonlinearity,“ Clinical chemistry, Jg. 39, Nr. 5, S. 766–772, 1993.
- [13] S. Allirani, „Direct Torque Control Technique for Voltage Source Inverter Fed Induction Motor Drive,“ International journal of electrical engineering, Jg. 5, S. 629–640, 2009.

- [14] A. Benheniche und B. Bensaker, „A High Gain Observer Based Sensorless Nonlinear Control of Induction Machine,“ *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Jg. 5, S. 305, 2015, doi: 10.11591/ijpeds.v5.i3.pp305-314.
- [15] J. F. Gülich, *Centrifugal Pumps*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [16] P. Lin, Y. Li, W. Xu, H. Chen und Z. Zhu, „Numerical study on the influence of inlet guide vanes on the internal flow characteristics of centrifugal pump,“ *Processes*, Jg. 8, Nr. 1, S. 122, 2020.
- [17] W. Cao und J. Mao, „Study of the affinity law of energy and cavitation characteristics in emergency drainage pumps at different rotating speeds,“ *Processes*, Jg. 7, Nr. 12, S. 932, 2019.
- [18] A. R. Al-Obaidi, „Investigation of effect of pump rotational speed on performance and detection of cavitation within a centrifugal pump using vibration analysis,“ *Heliyon*, Jg. 5, Nr. 6, 2019.
- [19] S. J. Julier und J. K. Uhlmann, „New extension of the Kalman filter to nonlinear systems,“ in *Signal processing, sensor fusion, and target recognition VI*, Bd. 3068, 1997, S. 182–193.
- [20] E. A. Wan und R. van der Merwe, „The unscented Kalman filter for nonlinear estimation,“ in *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No. 00EX373)*, 2000, S. 153–158.
- [21] P. Frogerais, J.-J. Bellanger und L. Senhadji, „Various ways to compute the continuous-discrete extended Kalman filter,“ *IEEE Transactions on Automatic Control*, Jg. 57, Nr. 4, S. 1000–1004, 2011.

# ProBaNNt

## Entscheidungsunterstützung bei der Kampfmittelräumung im Meer

### Autorenliste

<b>Torsten Frey</b>	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
<b>Jochen Mohrmann</b>	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
<b>Kevin Köser</b>	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
<b>Patrick Wetzels</b>	SeaTerra GmbH
<b>Dieter Guldin</b>	SeaTerra GmbH
<b>Jens Greinert</b>	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

---

### 1. Einleitung

Lange Zeit wurden Arbeiten zur Kampfmittelbeseitigung hauptsächlich an Land durchgeführt. Dies ist sowohl auf die von der Munition ausgehende unmittelbare Bedrohung der Sicherheit der Bevölkerung als auch auf die Fokussierung wirtschaftlicher Aktivitäten an Land zurückzuführen. Mit der Zunahme grundberührender kommerzieller Aktivitäten im Meer, insbesondere des Baus von Offshore-Windkraftanlagen, haben sich sowohl Industrievertreter als auch Wissenschaftler zunehmend mit dem Umgang mit Kampfmitteln im Meer befasst. Munition im Meer befindet sich einerseits in einigen bekannten Versenkungsgebieten. Dort wurde sie nach dem 2. Weltkrieg zum Zweck der Entsorgung verklappt. Andererseits gibt es Kampfmittel, die im Krieg eingesetzt und willkürlich in den europäischen Meeren verteilt sind. Besonders die zweite Gruppe stellt ein Risiko für alle Offshore-Aktivitäten dar.

Die Entscheidung über den Umgang mit den Kampfmitteln wird von speziell ausgebildeten Experten mit einem hohen Maß an Fachwissen getroffen. Die Kampfmittelräumung im Meer ist eine hochkomplexe Aufgabe, die umfangreiche Kenntnisse über (1) eine Vielzahl von Munitionstypen, (2) zahlreiche verfügbare Räumtechnologien und (3) die umgebende Meeresumwelt erfordert. Vor diesem Hintergrund hat das Projekt ProBaNNt die Möglichkeiten der Entscheidungsfindung bei der Kampfmittelräumung im Meer verbessert. Dieser Beitrag beschreibt die damit verbundenen Herausforderungen und berichtet über die im Projekt ProBaNNt entwickelten Lösungen und deren Verwertungsperspektive.

## **2. Ausgangssituation zu Projektbeginn**

### **In-situ Daten als Entscheidungsgrundlage**

Grundlage für die Entscheidung über das Vorgehen bei der Kampfmittelräumung ist zunächst die Fähigkeit, Informationen über Art, Zustand und Lage der Kampfmittel zu erheben. In der maritimen Kampfmittelräumung erfolgt die visuelle Datenerfassung in der Regel mit einer hochauflösenden Kamera, die beispielsweise an einem Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV) oder Airlift angebracht ist. In anderen Fällen werden Taucher eingesetzt, um ein aufgefundenes Kampfmittel zu untersuchen. Auch sie können eine Kamera mit sich führen, sodass sie von einem Unterstützungsteam an Bord des Schiffes überwacht und begleitet werden können.

In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte in der visuellen Unterwasserkartierung erzielt. Aufgrund der Brechung, Absorption und Rückstreuung des Lichts, der Partikel im Wasser und der Notwendigkeit künstlicher Beleuchtung ist die 3D-Rekonstruktion aus Bildern unter Wasser anspruchsvoller als an Land oder im Weltraum [1]. Sie wurde beispielsweise erfolgreich in der Munitionserkennung [2] und -rekonstruktion [3], beim Umweltmonitoring, in der Archäologie und der Inspektion von Infrastruktur eingesetzt. GEOMAR hat bereits großflächige Meeresbodenbilder von mehreren Hektar erzeugt [4, 5] und Munitionsobjekte aus Autonomous Underwater Vehicle (AUV)- und Taucheraufnahmen in 3D rekonstruiert. In trüben Gewässern, in denen die Sicht teilweise oder völlig eingeschränkt ist, werden sogenannte akustische Kameras eingesetzt, die auf dem Prinzip von Scanning-Sonaren mit mehreren Schallköpfen basieren. Sie liefern hochwertige akustische Daten mit einer hohen Bildrate. Solche Bilder wurden bereits erfolgreich zur Munitionsidentifikation genutzt [6, 7].

### **Methoden zur Entscheidungsfindung**

Basierend auf der Auswertung der resultierenden 2D-Bilder müssen Experten die Entscheidung treffen, wie mit einem bestimmten Munitionsobjekt zu verfahren ist. Die Entscheidung kann die Bergung des Objekts und der Transport zu einer Aufbereitungsanlage an Land, die Verbringung des Objekts unter Wasser oder die Durchführung einer In-Situ-Sprengung sein [8].

Zu Projektbeginn verfügten Experten nicht über die Möglichkeit, ihre eigene Einschätzung umfassend mit den Entscheidungen zu vergleichen, die andere Experten in der Vergangenheit getroffen haben. Zudem existierte kein objektives Verfahren zur Risikobewertung des Kampfmittelräumvorgangs. Sobald ein Munitionsobjekt gefunden wird, wird ein Arbeitsablauf durchgeführt, der sich von Unternehmen zu Unternehmen unterscheidet. Die meisten Entscheidungen werden hierbei ad hoc auf dem Räumschiff getroffen. Der Entscheidungsprozess ist selten vollständig dokumentiert: Er richtet sich nach Erfahrungsstand und Gründlich-

keit des Kampfmittelräum(KMR)-Experten und den zum Zeitpunkt des Einsatzes verfügbaren Werkzeugen.

Im Projekt DAIMON wurde eine Software zur Bewertung der Gefahr durch Munitionsobjekte und munitionsbelastete Flächen im Meer entwickelt [9]. Das Tool betrachtet verschiedene Umweltfaktoren zur Bewertung des Risikos, das von Munition für verschiedene Schutzgüter, einschließlich der Meeresumwelt, ausgeht. Es führt eine Risikobewertung auf der Makroebene durch. Entscheidungsträgern wird so die strategische Betrachtung für den Umgang mit munitionsbelasteten Flächen oder einzelnen Munitionsobjekten ermöglicht. Die Software ist jedoch nicht geeignet, Experten bei der Projektplanung oder dem Räumprozess zu unterstützen und das Risiko für das vor Ort befindliche Personal zu bewerten.

### **3. Ziele**

Basierend auf der oben beschriebenen Ausgangssituation ergab sich für das Vorhaben das folgende Gesamtziel:

Die Transformation der Entscheidungsfindung während der Kampfmittelräumung im Meer, von einem stark erfahrungsabhängigen, schwach strukturierten und wenig transparenten Prozess hin zu einem objektiven, strukturierten, reproduzierbaren und datengestützten Vorgehen.

Dem Ziel unterliegt die Annahme, dass die Räumentscheidung nicht auf einer situativen Ad-hoc-Analyse einzelner Experten basieren sollte. Stattdessen sollen verbesserte Möglichkeiten zur Aufbereitung optischer und akustischer Daten genutzt werden, um detailliertere Objektinformationen bereitzustellen. Eine KMR-Datenbank vergangener Räumensätze soll darüber hinaus den Abgleich mit Räumentscheidungen gleicher Objekte in der Vergangenheit ermöglichen. Die Entscheidungen sollen außerdem mit den Ergebnissen eines neuen Risikobewertungsmodells abgeglichen werden können. Diese neuen Werkzeuge stärken die Position von KMR-Experten, indem sie ihnen zusätzliche und verbesserte analytische Ressourcen zur Verfügung stellen. Durch diese Neuerungen werden die Kampfmittelräumung sicherer, zuverlässiger und vor allem nachvollziehbarer.

### **4. Projektergebnisse**

#### **Optische und akustische 3D-Rekonstruktion als Entscheidungsgrundlage**

Im Projektzeitraum wurden mehrere Forschungsfahrten durchgeführt, bei denen mit einem BlueROV2 oder durch Taucher Videos aufgenommen wurden. Hierzu wurden in den Versenkungsgebieten Kolberger Heide sowie Haffkrug und Pelzerhaken in der Lübecker Bucht Munitionshaufen aufgesucht. Aus den Videoaufnahmen konnten für mehrere Objekte 3D-Rekonstruktionen angefertigt werden. Dafür wurde die Software Metashape genutzt.

Beispielhaft zeigen wir hier zwei Objekte. Abb. 1 zeigt ein Kampfmittel, bei dem es sich vermutlich um den Sprengkörper einer Fieseler Fi 103 (NS-Propagandaname „V1“) handelt. Obwohl die Aufnahme mit dem BlueROV2 erzeugt wurde und zum damaligen Zeitpunkt keine ruhigen Trajektorien abgefahren werden konnten (zu dem Zeitpunkt hatte das ROV noch kein Doppler Velocity Log (DVL)), ist deutlich zu erkennen, dass ein Großteil der Hülle durchkorrodiert ist und der enthaltene Explosivstoff freiliegt. Wiederholte Untersuchungen des gleichen Objekts haben gezeigt, dass die Menge des Explosivstoffs abnimmt und er somit trotz geringer Strömungsgeschwindigkeiten in Lösung geht. Abb. 2 zeigt eine britische Grundmine. Die zugrundeliegende Videoaufnahme wurde bei klarer Sicht und gutem Wetter von einem Taucher aufgenommen. Die unruhige Oberfläche ist auf Biofouling auf dem Munitionskörper zurückzuführen. Die sich bewegende Meeresfauna ist für die Bildmustererkennung von Metashape schwierig zu verarbeiten. Die farbige Platte unterhalb des Objekts wurde vor der Videoaufnahme auf dem Meeresboden platziert und ermöglicht eine zuverlässige Farbkorrektur der Videodaten.

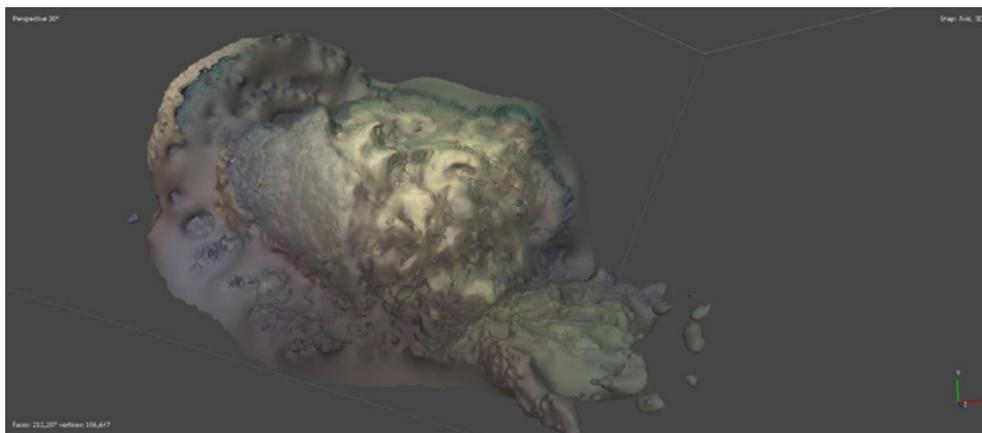


Abb. 1: 3D-Rekonstruktion aus einer Videoaufnahme eines Kampfmittels (vermutlich der Sprengkörper einer Fieseler Fi 103 (NS-Propagandaname „V1“) aus dem Versenkungsgebiet Pelzerhaken in der Lübecker Bucht.



Abb. 2: 3D-Rekonstruktion aus einer Videoaufnahme einer britischen Grundmine aus dem Versenkungsgebiet Kolberger Heide.

Da es sich bei der Erstellung von akustischen 3D-Modellen um ein völlig neues Verfahren handelt, wurden die Daten hierfür unter Laborbedingungen erzeugt. Dies erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), dessen Wassertank genutzt wurde und der Eggers Umwelttechnik GmbH, die die Munitions-Dummys für die Datenerhebung beisteuerte. Die Datenerhebung in einem Wassertank ermöglichte die kontrollierte und reproduzierbare Datenerhebung mit bekannten Trajektorien. Abb. 3 zeigt drei der Munitions-Dummys mit ARIS Soundings und dazugehörigen Frames der Videoaufnahmen. Die Objekte wurden von beiden Sensoren mit einem Roboterarm umrundet.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Artikels steht kein detailliertes 3D-Modell der akustischen Daten zur Verfügung. Ein Voxel-Grid mit niedriger Auflösung konnte erzeugt werden, welches eine Positionsbestimmung des beschallten Objekts ermöglicht. Dieses Voxel-Grid ist jedoch nicht geeignet, um Munition eindeutig von anderen Objekten zu unterscheiden oder gar eine Munitionsidentifikation vorzunehmen.



Abb. 3: Ansicht von drei Munitions-Dummys im Wassertank des DFKI. Links: Sounding der ARIS 3000 Explorer; rechts: optisches Kamerabild [10].

### **Kampfmittelräumdatensatz**

Von Fachfirmen wurden im Lauf der Jahre bereits tausende KMR-Daten erhoben. Diese blieben für eine gemeinsame Analyse bislang weitgehend ungenutzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass solche Daten in der Regel unveröffentlicht bleiben und nur schwer zugänglich sind. Des Weiteren ist die Zusammenstellung der Daten sehr aufwändig, da sie aus vielen vergangenen Räumprojekten zusammengesammelt werden müssen. Im Rahmen von ProBaNNt wurden solche Daten, die beim Projektpartner SeaTerra vorlagen, nun erstmals in einem KMR-Datensatz zusammengeführt. Der Datensatz enthält 436 KMR-Vorgänge. Er beinhaltet, soweit verfügbar, für jeden dieser Vorgänge detaillierte Informationen der Messdaten, die zur Lokalisierung der Kampfmittel führten. Des Weiteren sind einige Eigenschaften der Kampfmittel (etwa Typ, Größe, Masse und Explosivstoffmasse) aufgeführt. Wesentlich sind zudem die Angaben zum Umgang mit den Munitionsobjekten (Räumung, Transport, Sprengung, Verbleib unter Wasser).

## Risikobasierte Entscheidungsunterstützung

Das Risiko einer ungeplanten Detonation eines Kampfmittels hängt von einem komplexen Netzwerk von Faktoren ab, die sich gegenseitig bedingen und voneinander abhängen (siehe Abb. 4). Zur Berechnung des Risikos wurden die im Netzwerk bestehenden Zusammenhänge mathematisch ausgedrückt und zu Modelloutputs zusammengeführt. Das resultierende Modell zur Risikobewertung ermöglicht es, auf Basis von Informationen über ein Kampfmittel und die in seiner Umgebung vorherrschenden Umweltbedingungen die Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz einer ungewollten Detonation sowie die Komplexität der Räumaufgabe zu bewerten. Das Modell existiert als Excel-Datei und trägt den Namen „Risk assessment model for Unexploded underwater Military Munitions – RUMMs“ und wurde im Rahmen einer Doktorarbeit veröffentlicht [11].

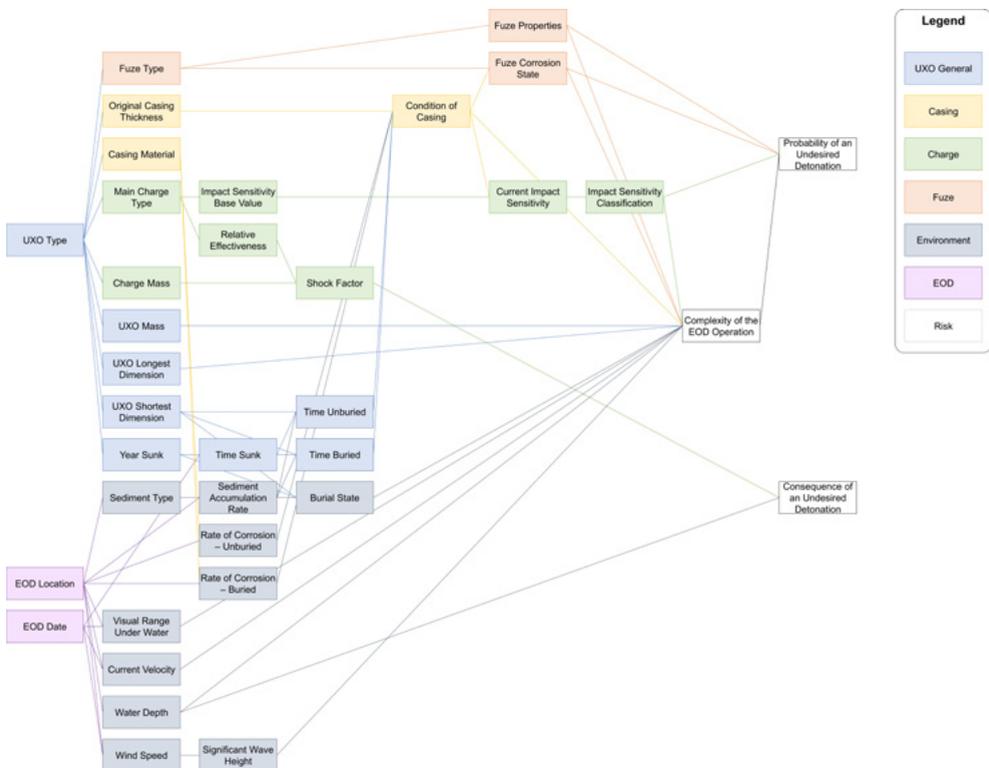


Abb. 4: Netzwerk von Faktoren, die das Risiko einer ungeplanten Detonation eines Kampfmittels beeinflussen [12].

Nach der Fertigstellung des Modells wurde es exploriert und getestet. Hierfür wurde unter anderem auf Daten aus dem KMR-Datensatz von SeaTerra zurückgegriffen. Es wurden zufällig zehn Räumvorgänge ausgewählt, die in Tab. 1

aufgeführt sind. Die Ergebnisse des Tests sind in Abb. 5 dargestellt. Die eingezeichneten Risikoschwellen wurden ermittelt, indem die Verteilung der Ergebnisse von 9000 Modelldurchläufen untersucht wurde. Für Objekte rechts der Risikoschwelle ist eine Sprengung oder ein Verbleib im Meer angeraten, da sie vermutlich nicht handhabungsfähig sind. Munition im unteren linken Quadranten kann geborgen werden. Im oberen linken Bereich finden sich Objekte, die ebenfalls geborgen werden können. Jedoch sollte aufgrund der hohen zu erwartenden Konsequenzen besonderes Augenmerk auf die Sicherheitsabstände gelegt werden. Beim Abgleich der Modellergebnisse mit den getroffenen Räumentscheidungen zeigt sich, dass das Modell jene Räumvorgänge mit einem hohen Risiko bewertet, die auch durch die Firma SeaTerra vor Ort gesprengt wurden (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Übersicht über zehn Kampfmittel aus dem KMR-Datensatz für die mit RUMMs eine Risikobewertung durchgeführt wurde[11].

<b>Nummer</b>	<b>Kampfmittel</b>	<b>Räumentscheidung</b>
1	30,5 cm Artilleriegranate	Hebung
2	10,5 cm Artilleriegranate	Hebung
3	10,5 cm Artilleriekartusche	Hebung
4	21,0 cm Artilleriegranate	Hebung
5	10,0 cm Mörsergranate	Verbringung unter Wasser und In-Situ-Sprengung
6	GP 500 Pfund Bombe	In-Situ-Sprengung
7	Teil einer INC 30 LB Brandbombe	Hebung
8	UMA Ankertaumine	Verbringung unter Wasser
9	BMC Ankertaumine mit Anker	Verbringung unter Wasser
10	Grundmine MK I-IV	In-Situ-Sprengung

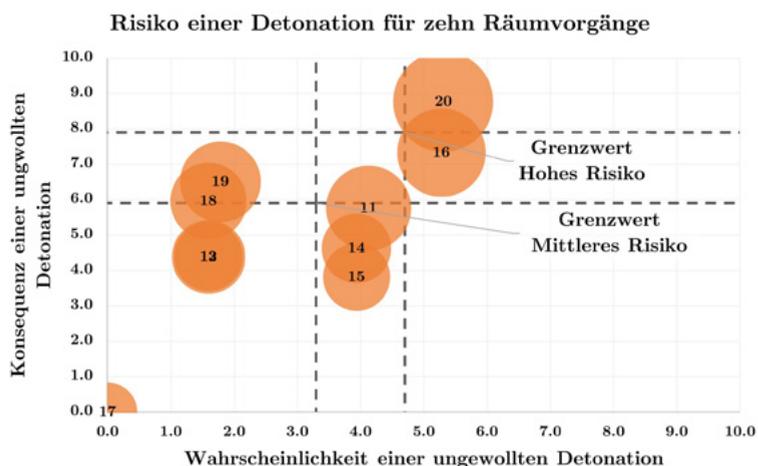


Abb. 5: Risikobewertung von zehn Munitionsobjekten aus dem KMR-Datensatz. Die Größe der Kreise bildet die berechnete Komplexität des Räumvorgangs ab.

Das Modell RUMMS wurde bereits über das GEOMAR veröffentlicht und kann vom OceanRep heruntergeladen werden [13]. RUMMS kann nun durch Unternehmen oder Behörden bei der Planung oder Durchführung von KMR-Einsätzen genutzt werden. Kommen KMR-Experte und Modell zum gleichen Ergebnis schafft dies Vertrauen in die Räumentscheidung. Weichen die Bewertungen voneinander ab, ist die Räumentscheidung des Experten zu überprüfen und bei fortbestehender Abweichung detaillierte zu begründen.

## 5. Nächste Schritte und Verwertung

### Optische und akustische 3D-Rekonstruktion

Optische 3D-Modelle ermöglichen eine bessere Ansicht von Objekten unter Wasser, wo die räumliche Orientierung aufgrund der eingeschränkten Sicht häufig eine Herausforderung darstellt. Zur Vorbereitung und Unterstützung der Räumung von Munitionshaufen in der Lübecker Bucht hat GEOMAR bereits Photomosaik zur Verfügung gestellt. Eine detaillierte dreidimensionale Ansicht der Munitionshaufen bietet zusätzliche Informationen für die Kampfmittelräumung. Insbesondere die Planung des Räumvorgangs kann somit erheblich verbessert werden. Darüber hinaus ist es möglich im Verlauf der Räumung eines Munitionshaufens wiederholt mit AUVs, ROVs oder Tauchern Video-Surveys durchzuführen. So kann der Räumprozess iterativ mit neuen Informationen über das sich ständig verändernde Lagebild unterstützt werden.

Die Erstellung dieser 3D-Modelle muss nicht durch GEOMAR erfolgen, da das Wissen zur Erstellung von 3D-Modellen auf Basis unter Wasser erhobener optischer Daten frei zugänglich gemacht wurde. Ein themenspezifisches Wiki wurde auf der Projektwebsite veröffentlicht und steht damit der Fachöffentlichkeit zur

Verfügung [14]. Da am GEOMAR kontinuierlich Erfahrungen mit der Erstellung von 3D-Modellen gesammelt werden, soll das Wiki hier fortgeschrieben werden.

Der im Rahmen des Projekts erhobene akustische Datensatz wurde ebenfalls bereits veröffentlicht [10] und steht der Wissenschaft zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Die Bearbeitung mit dem Ziel der Erstellung eines detaillierten akustischen 3D-Modells dauert noch an. Aber auch für das derzeit erzeugte Zwischenergebnis gibt es eine Verwertungsperspektive. Die Kenntnis der Lokation des mit der ARIS vermessenen Objekts ermöglicht zwar noch nicht seine Identifizierung, wohl aber das sicherere Greifen, etwa durch ein ROV. Der genutzte Algorithmus kann das niedrigaufgelöste Voxelgrid innerhalb kürzester Zeit berechnen. Seine Nutzung zur Positionsbestimmung eines Objekts kann daher bei schlechten Sichtverhältnissen (z. B. im Hafenbecken [15]) sinnvoll und niedrigschwellig in den Räumvorgang integriert werden.

### **Kampfmittelräumdatensatz**

Der in ProBaNNt erarbeitete Kampfmittelräumdatensatz wurde bereits für die Erstellung des Modells zur Risikobewertung genutzt. Darüber hinaus bietet er für SeaTerra weitere Möglichkeiten zur Verwertung. Erstmals ist es möglich, anstehende Räumentscheidungen mit denen aus der Vergangenheit abzugleichen. Der verantwortliche KMR-Experte kann seine Entscheidung zunächst unabhängig vom Inhalt des Datensatzes treffen und im Anschluss mit Räumentscheidungen der Vergangenheit abgleichen. Dies erzeugt zusätzliche Sicherheit und verbessert die Argumentationsgrundlage gegenüber beteiligten Behörden und dem Auftraggeber der Räumung. Diese Möglichkeit zur Entscheidungsunterstützung wird weiterhin verstärkt, wenn der Datensatz durch SeaTerra fortgeschrieben wird.

### **Modell zur Risikobewertung**

Vertreter von Kampfmittelräumfirmen, Ingenieurbüros, Auftraggebern und Behörden können RUMMs nun nutzen, um das Risiko von Kampfmittelräumungen zu modellieren und Entscheidungen mit den Modellergebnissen zu vergleichen. Aus wissenschaftlicher Sicht ist das Modell für weitere Fragestellungen Anschlussfähig. Im Rahmen von Modelltests wurde eine Monte-Carlo-Analyse zum besseren Verständnis der Modellergebnisse durchgeführt. Es ist ebenfalls möglich vergleichende Monte-Carlo-Analysen durchzuführen. Damit kann das Risiko aber auch in der Komplexität des Räumvorgangs in verschiedenen geographischen Räumen oder im Jahresverlauf verglichen werden. Auch eine Nutzung von RUMMs für Räumvorgänge in den Gewässern anderer Länder ist möglich. Hierfür muss jedoch eine Anpassung von Modelleingangsparametern vorgenommen werden. Die im Projektverlauf erarbeiteten Modell-Inputs wurden darüber hinaus bereits weiterverwendet. Im BMBF-finanzierten Projekt CONMAR der sustainMare Mission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) wird derzeit eine Prioritätenliste zur

Räumung von Munitionshaufen in bekannten Versenkungsgebieten der deutschen Ostsee erarbeitet [16]. Dafür wurde ebenfalls ein Ansatz gewählt, der die Risiken der Munition und die Komplexität der Räumung berücksichtigt. Die Modell-Inputs aus RUMMs bildeten hierfür eine wesentliche Grundlage [17].

Durch das Projekt konnte GEOMAR neue Kompetenzen in der Bewertung maritimer Risiken und Erarbeitung von Frameworks zur Entscheidungsunterstützung hinzugewinnen. Der in ProBaNNt genutzte Ansatz zur Erstellung des Modells kann auf andere Risiken angewendet werden. Denkbar sind etwa die Bewertung von Räumvorgängen an Land (wo ein solches Modell ebenfalls nicht existiert) aber auch anderer maritimer Risiken wie etwa der Umgang mit chemischen Kampfstoffen, Wracks, der Rückbau von Windkraftanlagen und die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung. Ausgehend von der Zunahme kommerzieller Aktivitäten auf See sind wir als Gesellschaft mit neuen Risiken konfrontiert, die als Emerging Maritime Risks bezeichnet werden können. Erforschung und Bewertung dieser Risiken werden in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen. Die Ergebnisse aus ProBaNNt haben hier Pionierarbeit geleistet.

## **6. Zusammenfassung**

Im Verbund wurden mehrere ambitionierte Ziele erreicht, die die Entscheidungsfindung bei der Kampfmittelräumung verbessern werden. Um dies zu erreichen, wurden neue Möglichkeiten der Nutzung von optischen und akustischen Daten angewendet. Die Erstellung optischer 3D-Modelle hat die Marktreife erreicht. Um akustische 3D-Modelle über die Positionsbestimmung hinaus nutzen zu können, sind noch weitere Arbeiten notwendig. Darüber hinaus wurden Ressourcen geschaffen, die es KMR-Experten ermöglichen, ihr geplantes Vorgehen zu überprüfen. Einerseits dient hierzu ein KMR-Datensatz mit über 400 Einträgen, der einen Blick auf vergangene Räumensätze und -entscheidungen ermöglicht. Andererseits wurde erstmals ein Modell zur Risikobewertung für die Kampfmittelräumung im Meer erarbeitet. Die Entscheidung eines KMR-Experten kann mit den Modellergebnissen abgeglichen und gegebenenfalls angepasst werden.

## **7. Dank**

Das Konsortium dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Bereitstellung der Fördermittel und dem Projektträger Jülich für die administrative Unterstützung. Des Weiteren danken wir unseren polnischen Partnern IO PAN und OBR CTM für die Zusammenarbeit im MarTERA-Projekt. Zuletzt möchten wir uns beim Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) und der Eggers Umwelttechnik GmbH für die gute Zusammenarbeit bei der Erhebung des akustischen Datensatzes bedanken.

## Literatur

- [1] K. Köser, U. Frese in *Intelligent Systems, Control and Automation*, v.96 (Ed.: F. Kirchner), Springer International Publishing AG, Cham, 2020, pp. 125–135, DOI 10.1007/978-3-030-30683-0\_11.
- [2] A. Shihavuddin, N. Gracias, R. Garcia, R. Campos, A. C. Gleason, B. Gintert, *Mar Technol Soc j* 2014, 48, 461, DOI 10.4031/MTSJ.48.4.7.
- [3] Y. Song, K. Köser, T. Kwasnitschka, R. Koch, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2019, XLII-2/W10 181, DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-181-2019.
- [4] T. Kwasnitschka, K. Köser, J. Sticklus, M. Rothenbeck, T. Weiß, E. Wenzlaff, T. Schoening, L. Triebe, A. Steinführer, C. Devey et al., *Sensors (Basel, Switzerland)* 2016, 16, 2164, DOI 10.3390/s16020164.
- [5] E. Simon-Lledó, B. J. Bett, V. A. I. Huvenne, K. Köser, T. Schoening, J. Greinert, D. O. B. Jones, *Sci. Rep.* 2019, 9, 1, DOI 10.1038/s41598-019-44492-w.
- [6] M. Grabowski, S. Fioravanti, R. Been, F. Cernich, V. Malejevas in *Towards the Monitoring of Dumped Munitions Threat (MODUM). A Study of Chemical Munitions Dumpsites in the Baltic Sea* (Eds.: J. Beldowski, R. Been, E. K. Turmus), Springer Netherlands, Dordrecht, 2018, pp. 19–47, DOI 10.1007/978-94-024-1153-9\_2.
- [7] P. Vanninen, A. Östin, J. Beldowski, E. A. Pedersen, M. Söderström, M. Szubska, M. Grabowski, G. Siedlewicz, M. Czub, S. Popiel et al., *Mar. Environ. Res.* 2020, 161, 105112, DOI 10.1016/j.marenvres.2020.105112.
- [8] T. Frey, R. Holländer, J.-U. Fischer, *Qualitätsleitfaden Offshore-Kampfmittelbeseitigung*, Logos Verlag, Berlin, 2019.
- [9] S. A. van der Vulp, *Decision Support System for Marine Munitions. User Manual*, EGEOS GmbH, 2021.
- [10] N. Dahn, M. Bande Firvida, P. Sharma, J. Mohrmann, O. Geisler, P. K. Sanghamreddy, K. Marquardt, L. Christensen, *An Acoustic and Optical Dataset for the Perception of Underwater Unexploded Ordnance (UXO)*, Zenodo, 2024.
- [11] T. Frey, *A New Risk Assessment Model for Unexploded Underwater Military Munitions*, Dissertation, Leipzig University, Leipzig, 2024.
- [12] T. Frey, *Propellants Explo. Pyrotec.* 2024, 49, 4e202300206, DOI 10.1002/prop.202300206.
- [13] T. Frey, *Risk assessment model for Unexploded underwater Military Munitions (RUMMs)*, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Germany, Kiel, 2024, DOI 10.3289/SW\_1\_2024.

[14] J. Mohrmann, T. Frey, N. Diller, K. Heger, T. B. von See, J. Greinert, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, „Underwater Photogrammetric 3D Reconstruction“, <https://probannt-munition.eu/wiki/>, 2024. (Accessed 2024-10-07).

[15] D. G. Gallagher in OCEANS'11 MTS/IEEE KONA, 2011. MTS; IEEE. Kona (HI), DOI 10.23919/OCEANS.2011.6106892.

[16] T. Frey, J. Greinert, Munition in the Seas. Current Knowledge and Perspectives, DAM, Berlin, 2022.

[17] W. Sichermann, T. Frey, W. Hesse, J. Greinert, Kriterien und Auswahl der Erprobungsgebiete. Machbarkeitsstudie und Koordinationsvorhaben zum Sofortprogramm Munitionsaltlasten in Nord- und Ostsee, Seascope GmbH/entwicklungswerft; GEOMAR, 1635-2603-02, 2024.

# Nemo

## Nachhaltige Erweiterung maritimer Observation

### Autorenliste

<b>Katja Döhl</b>	Deutor Cyber Security Solutions GmbH
<b>Dr. Stefanie Frey</b>	Deutor Cyber Security Solutions GmbH
<b>Patrick Spreiter</b>	Airbus
<b>Dr. Camilla Mohrdieck</b>	Airbus
<b>Markus Jochum</b>	Airbus
<b>Johannes Stadlinger</b>	Arina Deutschland GmbH
<b>Daniel Blum</b>	Arina Deutschland GmbH
<b>Manjunatha Veerappa</b>	Fraunhofer IOSB
<b>Alexander Kröger</b>	Fraunhofer IOSB

---

### 1. Einleitung

Laut der Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung wurden im Jahr 2019 rund 80 % des Welthandels über den Schiffsverkehr abgewickelt. Über 95.000 Handelsschiffe sind auf den Weltmeeren im Einsatz, auf denen mehr als 1,6 Mio. Menschen arbeiten. Deutschland ist vom internationalen Handel abhängig und hat als eine der führenden Exportnationen großes Interesse an einem leistungsfähigen und umweltfreundlichen Seeverkehr auf gesicherten Seewegen. Dem gegenüber steht jedoch, dass maritime Gebiete und legale Lieferwege für illegale Aktivitäten wie z. B. illegale Fischerei, illegalen Handel, Schmuggel, Umweltverbrechen und Piraterie ausgenutzt werden, was einen großen wirtschaftlichen Schaden nach sich zieht.

Illegale Fischerei, die auf der Liste der transnationalen Kriminalität auf Platz 6 steht, ist nicht nur ein Umweltverbrechen mit katastrophalen Folgen für die Ozeane, sondern der hinter der illegalen Vorgehensweise stehende wirtschaftliche Schaden ist enorm. So wird laut der EU 19 % des tatsächlich gemeldeten Fischfangs illegal gefischt. Damit entsteht jährlich nach Schätzungen ein wirtschaftlicher Schaden von 10 Mrd. Euro. Ein weiteres Beispiel ist der illegale Tropenholzhandel welcher den Ab- und Weitertransport, sowie den Handel von Holz, welches illegal geschlagen wurde, adressiert. Aufgrund der Beschaffenheit von Holz ist der Seeweg der zentrale Transportweg. Auf der Liste der transnationalen Kriminalität steht illegales Roden auf Platz 3. Berechnungen besagen, dass 2009 weltweit bis zu 300 Mio. m<sup>3</sup> Rohholz illegal eingeschlagen worden sind,

wovon bis zu 13 % in der EU landeten. Die monetären Verluste für Unternehmen und Staaten durch den illegalen Holzhandel wurden 2002 von der Weltbank bereits auf 10-15 Mrd. US-Dollar/Jahr geschätzt.

Aktuelle Ansätze, diesen Herausforderungen zu begegnen, sind u. a. Verfahren, die bei der Überwachung der Seewege unterstützen. Dies sind oft integrierte Lage-darstellungen und Verfahren der Künstlichen Intelligenz (KI), kombiniert mit multisensoriellen Daten, die den maritimen Raum mit seinen Infrastrukturen und Aktivitäten erfassen (z. B. Automatic Identification System (AIS), Radar, Satelliten-gestützte Bilddaten) und analysieren, um so illegale Aktivitäten zu identifizieren. Unberücksichtigt bleibt, dass hinter vielen illegalen Aktivitäten Netzwerke bzw. Organisationen stehen, die entsprechende digitale Datenspuren bzw. Datenströme hinterlassen.

Ziel von NEMO ist es, ein leicht bedienbares Tool zu entwickeln, das es einer Viel-zahl von Nutzern ermöglicht, maritime Lieferketten einfacher zu überwachen und auftretende Anomalien zu detektieren. Beispielhaft an zwei verschiedenen Liefer-ketten gezeigt, wird ein Ansatz entwickelt, der generisch auf jede Art von Liefer-kette übertragen werden kann. Hierzu werden im ersten Schritt Informationen über die Prozessketten der beiden Beispielszenarien gesammelt und diese detailliert dargestellt, um auf deren Basis das Verbrechensmodell zu entwickeln. Auf dieser Grundlage werden verschiedene Daten ausgewertet und die Informationen fließen in die Entwicklung der KI sowie der Überwachung der Meeresgebiete. Alle erhaltenen Informationen werden fusioniert und in eine Lagebilddarstellung integriert, die letztendlich eine gute Übersicht schafft und in der Lage ist Anomalien zu erkennen und zu beschreiben.

## **2. Analyse der Prozesskette und Verbrechensmodell**

Produkte durchlaufen viele Stationen mit verschiedenen Stakeholdern, bevor sie beim Endverbraucher ankommen. Der Globalisierung und Digitalisierung aller Aspekte geschuldet, werden hierbei enorme Datenmengen verursacht, die manuell gar nicht mehr analysierbar sind. Illegale Aktionen, die in legalen Prozessketten als Anomalien auftreten können, sind nur sehr schwierig zu identi-fizieren. Nur, wenn verstanden wird, wie heutige Lieferketten aufgebaut sind, welchen Weg Produkte nehmen und wer daran beteiligt ist, können diese detek-tiert und somit die Grundlage für sichere und resiliente Lieferketten geschaffen werden.

Als Grundlage für das Projekt wurden die einzelnen Prozessschritte der unter-suchten Szenarien genau aufgeklärt und dokumentiert indem mit Hilfe verschie-dener Datenquellen, wie online Datenbanken (öffentlich und nicht-öffentlich), aber auch durch Insider-Interviews, digitale Spuren ausgewertet wurden.

Die Lieferketten der Beispielszenarien wurden analysiert und graphisch ausgewertet: die Lieferkette von Tropenholz aus Indonesien und die von atlantischem Blauflossenthunfisch (BFT) (Überblick über alle Stationen in Abb. 1), der im Mittelmeer gefangen wird, worauf im Projekt der Fokus gelegt wurde.

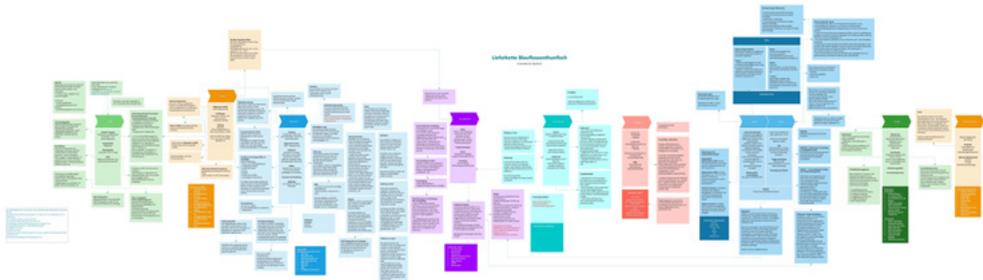


Abb. 1: Detaillierte Lieferkette des Blauflossenthunfisches.

Um den generischen Ansatz zu verdeutlichen wurde ebenfalls gezeigt, dass Lieferketten immer einen gleichen Ablauf besitzen. Die vereinfachte Darstellung ist in Abb. 2 gezeigt.

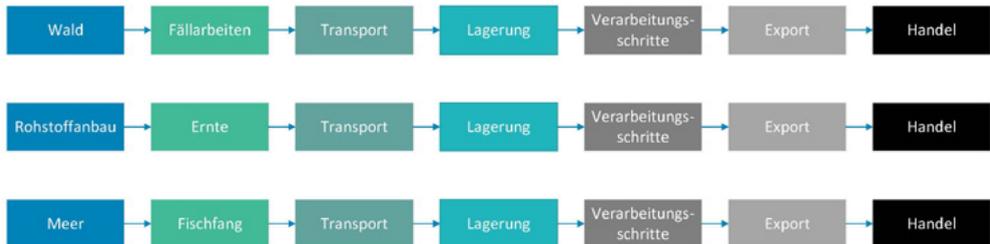


Abb. 2: Schematische, vereinfachte Darstellung der Lieferketten sowie der generischen Lieferkette.

Durch die Analyse der in komplexen Prozessketten generierten digitalen Daten sind spezifische Verbrechensmodelle abgeleitet worden, die es dem Nutzer ermöglichen kriminelle Aktivitäten gezielter und frühzeitiger zu erkennen und mit entsprechenden Schutzmechanismen zu bekämpfen. Das Verbrechensmodell umfasst die entsprechenden Korrelationen von Unternehmen und Verflechtungen von Eigentumsverhältnissen der Stakeholder. Es zeigt Missbrauchspotenziale auf und liefert grundlegende Information zur Detektion von Anomalien bzw. Abweichungen der normalen Prozesse, die bei der weiteren maritimen Überwachung zur gezielten Erkennung illegaler Aktivitäten mit einbezogen wurden.

Zur Bewertung des Ansatzes, der im Projekt NEMO verfolgt wird, sowie der Bedarfsermittlung und zur Gewinnung von Informationen wurde eine Nutzeranalyse durchgeführt mit verschiedenen Teilnehmern aus Behörden, Groß- und Einzelhandel sowie Logistik. Die Befragung der Stakeholder der Lieferketten

wiesen einen großen Bedarf nach Anwendungen zum Tracking von Lieferketten auf. Nahezu alle Befragten gaben an, dass es ihnen fast unmöglich sei, ihre Produkte mehr als zwei Schritte zurück zu verfolgen oder zu sagen, wie es nach ihrer Station weiter geht. Ebenfalls wiesen verschiedene Behördenvertreter darauf hin, dass es bei der großen Menge an Importwaren, die nach Deutschland kommen, unmöglich sei, diese genau zu überwachen und zu prüfen.

### **3. Datenzugang und Datenbewertung**

Die Grundlage des Projekts war die Identifikation und Bewertung relevanter Datenquellen, die zur Analyse der Prozessketten sowie zur Bewertung der Seelage und somit zur Detektion von Anomalien beitragen können.

#### **Datenerhebung zur Bewertung der Seelage**

Hierbei lag der Fokus auf AIS-Daten, SAR-Bildern und passiven RF-Daten mit Hinblick auf ihre Qualität und Verfügbarkeit. Ein besonderes Augenmerk lag auf kommerziellen und öffentlichen Satelliten-Systemen und -Missionen. Wichtig war auch, dass diese Daten für die untersuchten Gebiete nicht länger als 24 Stunden auseinander lagen. Zur Durchführung des Vorhabens wurden schließlich AIS-Daten von Orbcomm und Spire, SAR-Daten der TerraSar-X Satelliten und RF-Daten der Firma HawkEye360 beschafft.

Abb. 3 zeigt eine schematische Übersicht der Informations- und Datenquellen sowie der von ihnen bereitgestellten bzw. gemessenen Daten, die im Projekt NEMO analysiert und verarbeitet worden sind. Darunter sind sowohl kooperative Quellen (Datenerhebung und Übermittlung erfolgen unter Mitwirkung des Schiffes und setzen daher dessen Kooperation voraus) wie AIS, sowie nicht-kooperative Quellen (Datenerhebung erfolgt unabhängig vom Verhalten des Schiffes und in der Regel ohne sein Wissen), hier SAR-Daten und HawkEye360-Daten. Für die Fragestellungen im Projekt NEMO wurden einerseits die AIS Rohdaten analysiert. Aufgrund der nicht immer gegebenen Zuverlässigkeit dieser Daten wurden andererseits die AIS Daten auch im Zusammenhang mit nicht-kooperativen Sensordaten (SAR-Bildern und Hawk-Eye 360 Messungen) bewertet und analysiert.

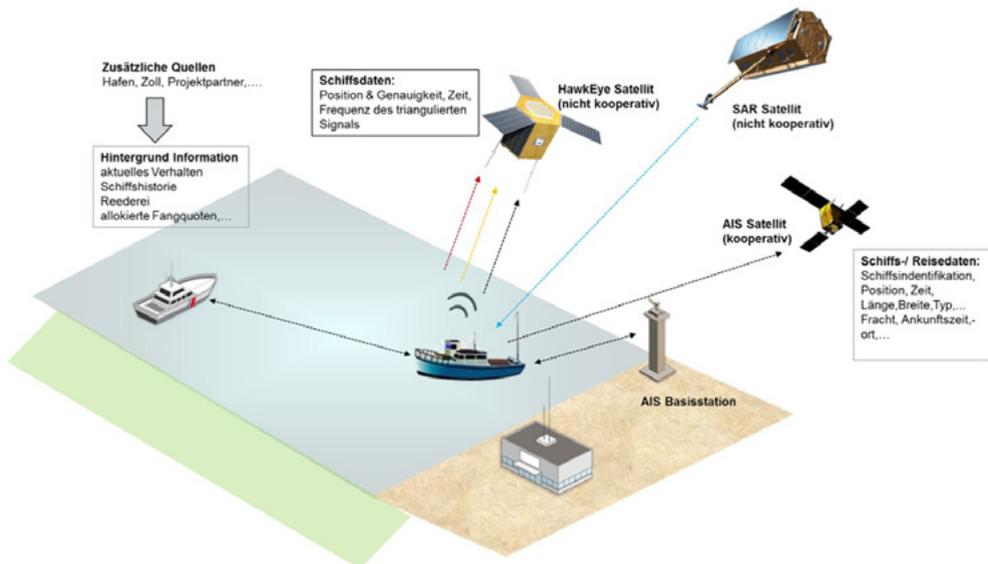


Abb. 3: Übersicht der im Projekt NEMO verwendeten Datenquellen und Datentypen.

Zur gemeinsamen Analyse der drei Datenquellen wurde eine Datenfusionssoftware verwendet. Das Ziel einer multi-sensoriellen Datenfusion ist es, die Bewegung von Objekten - wie zum Beispiel von Schiffen - mit einer größeren Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu schätzen, als dies mit nur einem Sensortyp oder auch nur einem einzigen Sensor möglich wäre, da Messungen von Objekteigenschaften, wie Positionen, Geschwindigkeiten und Orientierungen zu einer bestimmten Zeit immer Fehler behaftet sind.

Das Endprodukt des multi-sensoriellen Trackings ist ein Lagebild, in dem jedes Objekt von Interesse durch genau einen Multi-Sensor Track repräsentiert wird, in welchem die Messungen und Informationen aller Sensoren und Informationsquellen zu diesem Objekt zusammengefasst sind. Dies ist schematisch in Abb. 4 durch die Sensoren und Informationsquellen dargestellt, die im Projekt NEMO zum Multi-Sensor Tracking verwendet wurden. Es sei noch erwähnt, dass der Multi-Sensor Track eines Objektes hoch-dynamisch ist, d.h. er kann sich prinzipiell von Messung zu Messung der Sensoren ändern, indem einige Sensoren nicht mehr zu ihm beitragen oder andere neu hinzukommen.

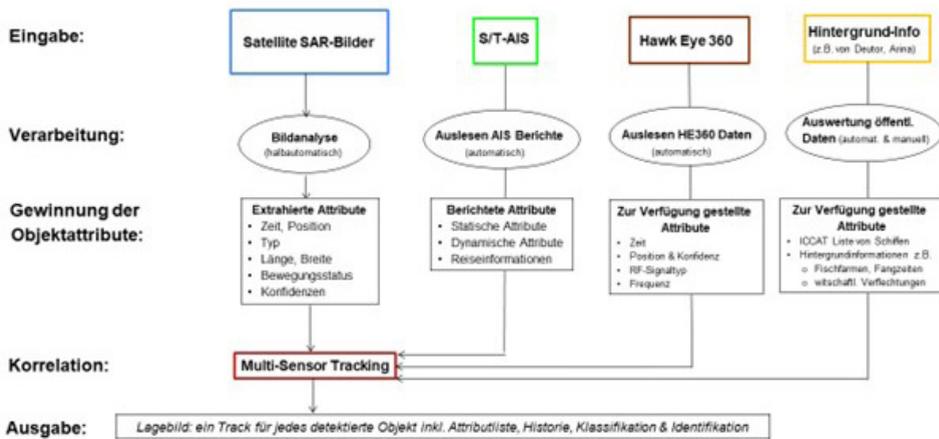


Abb. 4: Multi-Sensor Tracking im Projekt NEMO.

Der Informationsgewinn durch Fusion heterogener und komplementärer Sensordaten lässt sich am Beispiel in Abb. 5 gut erkennen. Blaue Pfeile im Bild verdeutlichen den Bewegungsverlauf eines Schiffes, der ausschließlich unter Nutzung von AIS-Daten berechnet wurde. Dieser Verlauf ist für ca. 34 Minuten unterbrochen, in denen es keine AIS Daten von dem Schiff gibt. Über den Verbleib und das Verhalten des Schiffes während der unterbrochenen Phase lassen sich in der Regel keine Aussagen treffen. Existieren allerdings komplementäre Sensordaten, die sich zum AIS-Track korrelieren lassen, dann kann diese Wissenslücke gefüllt werden. Hier konnte durch das Fusions-System eine SAR-Aufnahme des TerraSAR-X Satelliten in Ort und Zeit mit dem AIS Track korreliert werden. Daher kann angenommen werden, dass das Schiff seinen geradlinigen Kurs beibehalten hat in der Zeit, in der es keine AIS Daten übermittelt hat.

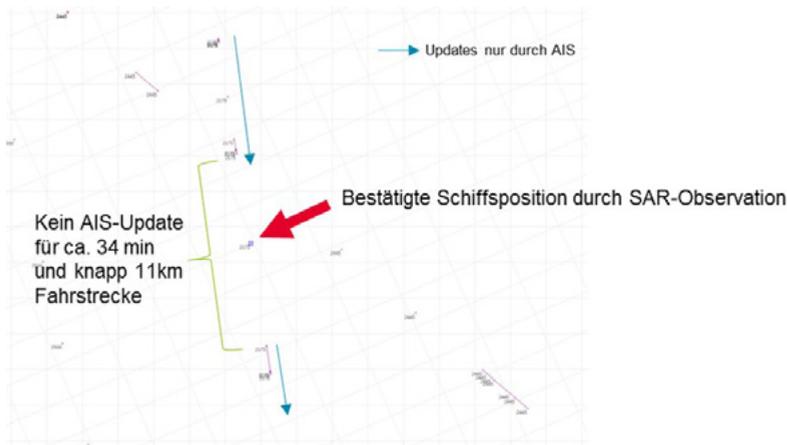


Abb. 5: Korrelation eines AIS-basierten Schiffstracks mit einer Satellitenbeobachtung.

Im Projekt NEMO wurden die in Abb. 3 gezeigten Datentypen in einem Gebiet um Malta herum gesammelt und verarbeitet. Dieses Gebiet ist deshalb gewählt worden, weil a) aus der Analyse der Prozesskette und der Erstellung des Verbrechensmodells geschlossen wurde, dass im zentralen Mittelmeer immer wieder illegal nach Blauflossenthunfisch und anderen Fischarten gefischt wird und weil b) für dieses Gebiet alle Datentypen aus Abb. 3 in einem Zeitraum von ca. zwei Monaten (Mai, Juni 2021) erworben werden konnten. Abb. 6 zeigt dieses Gebiet, das in etwa die FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Gebiete 13 (Golf von Hammamet), 14 (Golf von Gabès) und 15 (Malta) umfasst.

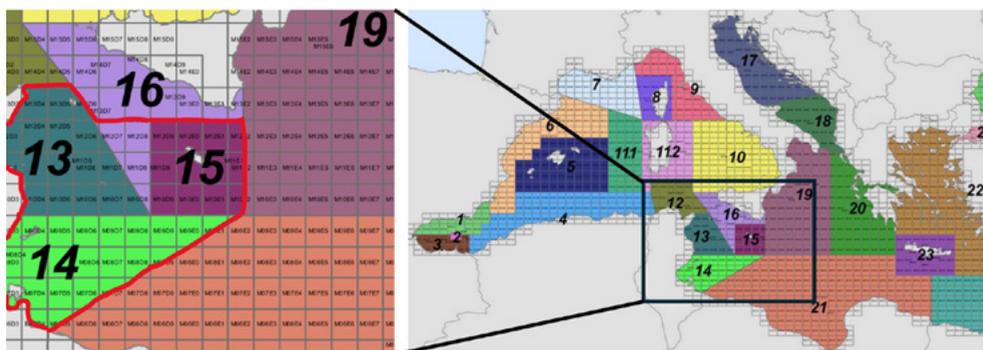


Abb. 6: Betrachtetes Gebiet (rot umrandet), in dem Multi-Sensor Tracking angewendet wurde. (linke Seite: Nahaufnahme der untersuchten Gebiete, rechte Seite: Übersicht über den Mittelmeerraum)

### Wichtige Datenquellen und deren Bewertung

Die Verarbeitung der folgenden Daten erfolgte hauptsächlich mit der Software Nuix, die als initiale Plattform für die Datenaufbereitung diente. Im Verlauf des Projekts wurden mehrere entscheidende Datenquellen identifiziert und einer detaillierten Machbarkeitsanalyse unterzogen. Einen Auszug der Wichtigsten sind hier aufgeführt:

- **ORBIS-Datenbank:** ORBIS von Moody's Analytics lieferte umfassende Informationen zu Unternehmensstrukturen, Eigentumsverhältnissen und Schiffsregistrierungen. Die Daten wurden über eine speziell entwickelte REST-API automatisiert in Nuix importiert. Diese Automatisierung war entscheidend, um die Daten effizient und in großem Umfang zu verarbeiten.
- **AIS-Daten:** AIS Daten sind essenziell für die Verfolgung von Schiffen und deren Bewegungen. Diese Daten lagen in unterschiedlichen Formaten vor, was eine Anpassung und Konvertierung für die Verarbeitung in Nuix erforderte. Die Integration in NEMO ermöglichte es, Schiffsbewegungen zu analysieren und verdächtige Aktivitäten zu identifizieren.

- Satellitendaten: Airbus stellte sowohl Rohdaten im KMZ-Format als auch fusionierte Datenstrukturen zur Verfügung. Diese Daten wurden durch speziell entwickelte Skripte in Nuix und den Digitalen Lagetisch eingelesen und verarbeitet.
- Daten der International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas (ICCAT): Diese Daten umfassten Informationen zur Registrierung und Überwachung von Schiffen, die im Thunfischfang tätig sind. Ihre Integration ermöglichte eine detaillierte Analyse der legalen und potenziell illegalen Fischereiaktivitäten.
- Daten zu Illegal, Unreported and Unregulated (IUU) Fishing: Diese Datenquelle lieferte Informationen zu illegalen Fischereifahrzeugen und Aktivitäten, die in die Nuix-Plattform integriert wurden, um eine bessere Erkennung von Verstößen zu ermöglichen.
- Hafendokumente und Logistikdaten: Diese Daten, unter anderem von Häfen wie Hamburg, wurden verwendet, um den Weg von Waren und Schiffen nachzuverfolgen und Anomalien in den Lieferketten zu identifizieren.
- TM-Tracking (TMT): Diese Daten umfassen Tracking-Informationen, die für die Analyse und Korrelation von Schiffsbewegungen mit anderen Datenquellen genutzt wurden.
- Internationale Sanktionslisten: Diese Listen wurden hinzugefügt, um Netzwerke und Unternehmen zu identifizieren, die mit sanktionierten Entitäten in Verbindung stehen könnten.

### **Verarbeitung und Konsolidierung der Daten**

Die Verarbeitung und Konsolidierung der verschiedenen Datenquellen stellte eine wesentliche Herausforderung dar, insbesondere aufgrund der unterschiedlichen Formate und Strukturen der Daten. Nuix spielte dabei eine zentrale Rolle als Datenverarbeitungs-Software, die es ermöglichte, diese heterogenen Daten in ein einheitliches Analyseformat zu überführen.

Jede Datenquelle wurde einer Machbarkeitsanalyse unterzogen, um die technische Eignung für die Verarbeitung zu bewerten. Dies umfasste die Analyse der Datenformate (z.B. XML, KMZ, JSON) und die Entwicklung entsprechender Skripte, die eine reibungslose Integration in die Analyseplattform sicherstellten. Die konsolidierten Daten wurden teilweise in die Neo4j-Datenbank überführt, um komplexe Beziehungsnetzwerke darzustellen und zu analysieren. Diese Graph-basierte Datenbank ermöglichte eine tiefgehende Analyse von Verbindungen

zwischen Schiffen, Unternehmen und potenziell illegalen Aktivitäten. Dies dient als Grundlage für die Demonstrations- und Evaluationsplattform.

#### **4. KI-basierte Detektion illegaler Aktivitäten**

Zur automatischen Erkennung illegaler Aktivitäten im maritimen Bereich wurde im Rahmen von NEMO ein hybrides KI-Verfahren entwickelt, welches sich nicht nur auf die Ergebnisse datengetriebener KI-Verfahren stützt, sondern auch auf explizites Wissen über maritime Abläufe, Regeln und Regelungen, aus denen im ersten Schritt entwickelten Prozessketten, um intelligente Entscheidungen zu treffen. Hierfür wurde ein grafisches Modell, das so genannte Bayes'sche Netz (BN), genutzt.

BN ist ein grundlegendes probabilistisches Verfahren zur Erkennung spezifischer Situationen. Für die Anwendung im Bereich der intelligenten Seeüberwachung kann ein BN bspw. zur Erkennung illegaler Fischereiaktivitäten eingesetzt werden. Abb. 7 zeigt ein solches BN zur Erkennung illegaler Fischerei. Es umfasst folgende Knoten:

- **Fischereierkennung** (engl.: »Fishing\_Activity\_Detection«): Dieser Knoten dient der Darstellung, ob ein Schiff fischt. Er umfasst noch zwei Unterknoten: Fischereierkennungsmodell und Navigation\_Status der AIS-Daten. Illegale Fischerboote versuchen oft, ihre Fischereiaktivitäten zu verbergen, indem sie ihren Status in den AIS-Meldungen falsch oder gar nicht angeben. Dazu wurde ein datengetriebenes KI-Verfahren mit neuronalen Netzen auf AIS-Daten-Basis entwickelt, um zu erkennen, ob ein Schiff zu einem bestimmten Zeitpunkt gefischt hat. Außerdem wurde das Merkmal „Navigationsstatus“ als einer der Knotenpunkte berücksichtigt, um einen Vergleich zwischen der tatsächlichen Aktivität und der gemeldeten Aktivität zu ermöglichen.
- **Anomalie-Erkennung** (engl.: »Anomaly\_Detection«): Dieser Knoten gibt an, ob das Schiff als Anomalie klassifiziert ist. Hierzu wurde ein datengetriebenes KI-Verfahren zur Erkennung von Anomalien entwickelt. Das Modell verwendet maschinelle Lernverfahren, um Abweichungen vom erwarteten Verhalten bei maritimen Aktivitäten zu erkennen.
- **Verbotenes Fischereigebiet** (engl.: »Restricted\_Fishing\_Area«): Dieser Knoten stellt dar, ob sich ein Schiff zurzeit in einem verbotenen Fischereigebiet befindet. Zu den verbotenen Gebieten können beispielsweise Meeresschutzgebiete, Hoheitsgewässer oder Gebiete mit speziellen Fangregelungen gehören.
- **IUU-Schiff auf der Schwarzen Liste** (engl.: »Ship\_Blacklisted«): Dieser Knoten zeigt an, ob ein Schiff als an IUU-Fischerei beteiligt identifiziert worden ist.

Die Integration von „Blacklist“-Informationen zur IUU-Fischerei in das BN ermöglicht eine proaktive Identifizierung bekannter Straftäter und erleichtert den Kontrollbehörden die wirksame Bekämpfung illegaler Fischereiaktivitäten.

- ICCAT-registriertes Schiff (engl.: »ICCAT\_Registered«): Dieser Knoten zeigt an, ob ein Schiff bei der ICCAT registriert ist. Mit dieser Registrierung darf das Schiff Blauflossenthunfisch (BFT) fischen. Dadurch lässt sich feststellen, welche Schiffe legal tätig sind und welche möglicherweise illegal fischen.
- Verbotene Fischereizeiten (engl.: »Restricted\_Fishing\_Time«): Dieser Knoten zeigt an, ob ein Schiff in einem bestimmten Zeitraum BFT fangen darf. Zum Schutz der Fischpopulationen gelten zu bestimmten Zeiten des Jahres Fischereiverbote. Durch die Überprüfung, ob ein Schiff während dieser Zeiträume fischt, kann das System illegale Fischereiaktivitäten erkennen.

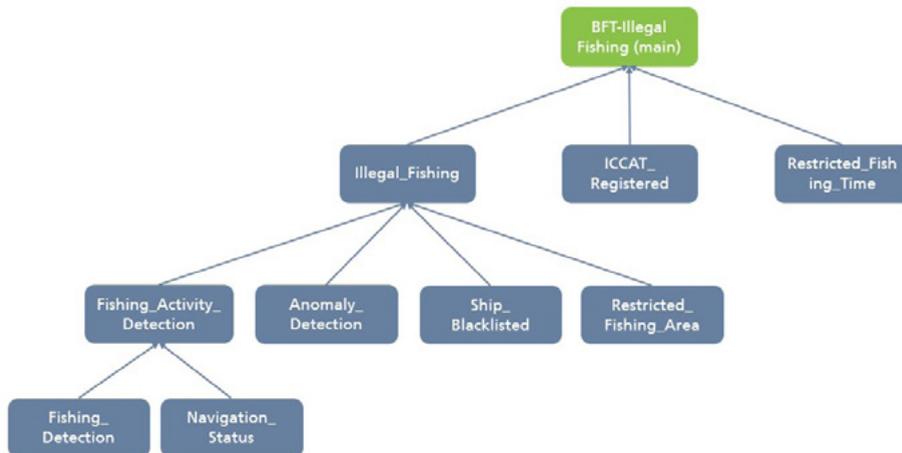


Abb. 7: Darstellung eines Bayes'schen Netzes zur Erkennung der illegalen BFT Fischerei.

### Beispielergbnis

Ein Beispielszenario ist in Abb. 8 dargestellt, die zeigt, wie ein BN verwendet wird, um illegale Fischerei zu erkennen. In diesem Szenario sind alle Eingabeknoten (orange) wie „Fishing\_Detection“, „Anomaly\_Detection“, „ICCAT\_Registered“ und „Restricted\_Fishing\_Time“ auf „true“ gesetzt (berechnet aus entwickelten KI-Verfahren und Expertenwissen), mit Ausnahme der Knoten „Ship\_Blacklisted“ und „Restricted\_Fishing\_Area“. Die blauen Knoten zeigen die berechneten Werte. Die berechneten Werte (siehe Abb. 9), sind das Ergebnis des hybriden KI-Verfahrens, dargestellt als Wahrscheinlichkeiten jedes blauen Knotens. Am Beispiel von „BFT-IllegalFishing (Main)“ wäre das Ergebnis 90,94%. Das bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 90,94 % eine illegale Aktivität erkannt wird. Obwohl das Schiff BFT fischen darf, wird es als illegal erkannt. Vom KI-Modell wird eine

Anomalie berechnet (siehe Knoten Anomaly\_Detection) weil es während der verbotenen Fangzeit fischt (siehe Knoten Restricted\_Fishing\_Time).

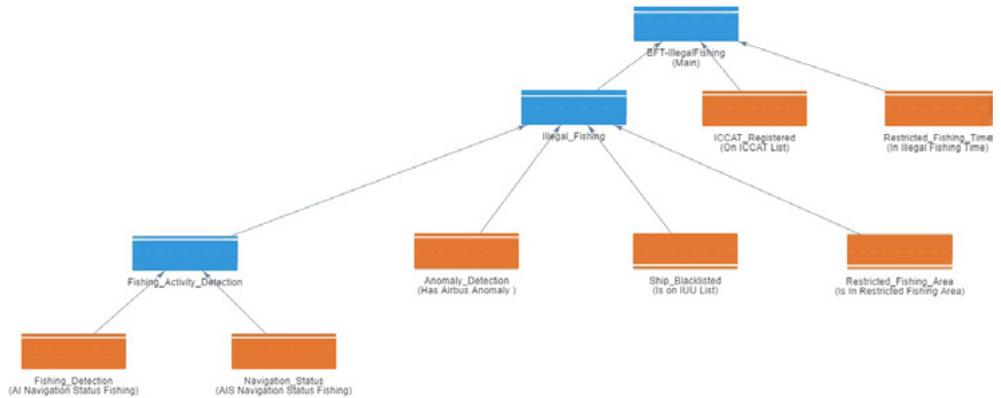


Abb. 8: Darstellung eines Bayes'schen Netzes zur Erkennung der illegalen BFT Fischerei im DBN-Editor.



Abb. 9: Ergebnis des hybriden KI-Verfahrens/Bayes'sches Netz.

Durch die Einstellung eines bestimmten Schwellenwerts kann die Instanz als Anomalie klassifiziert und im Digitalen Lagetisch (DigLT)-Demonstrator angezeigt werden. Zusätzlich kann ein Alarm aktiviert werden. Ein solches Beispiel ist in Abb. 10 dargestellt, wo die Anomalie visualisiert wird.

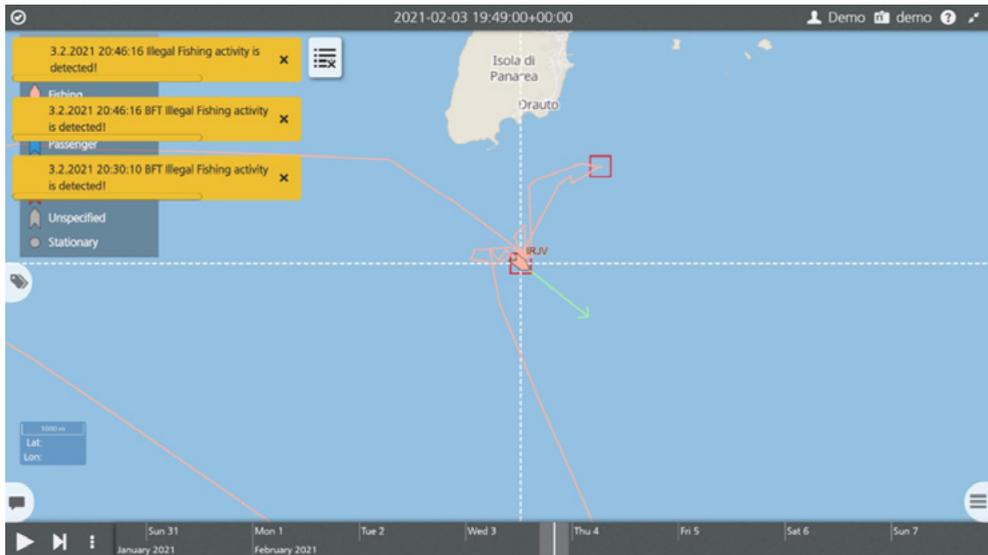


Abb. 10: Im Digitalen Lagetisch werden Anomalien visualisiert, die durch den BFT Illegal Fishing Graphen erzeugt wurden.

## 5. Demonstrationsplattform

Als Demonstrationsplattform wird der Digitale Lagetisch verwendet (DigLT). Der DigLT ist ein Geoinformationssystem, welches die Möglichkeit bietet, zeit- und georeferenzierte Daten zu visualisieren. AIS-Daten, Fischfanggebiete und Ergebnisse von KI-Verfahren mit Anomalien können so auf einer Layer-basierten Karte angezeigt werden. Ein wichtiges Feature des DigLTs ist die Zeitleiste, mit der man in der Zeit springen kann, um Anomalien oder das Verhalten von Schiffen genauer zu untersuchen.

Im Projekt NEMO wurden auf Basis der erstellten Lieferkette für atlantischen Blauflossenthunfisch historische AIS-Daten in den Lagetisch geladen. Für jeden Schiffstyp wurde ein eigener Layer verwendet, welches das Filtern von Daten vereinfacht. Des Weiteren wurden Anomalien ebenfalls als eigener Layer gespeichert. Die Interaktion umfasst sowohl das Einblenden von Details über das Schiff als auch über die Anomalien. Es ist zudem möglich die Funktionalität über weitere Plugins zu erweitern.

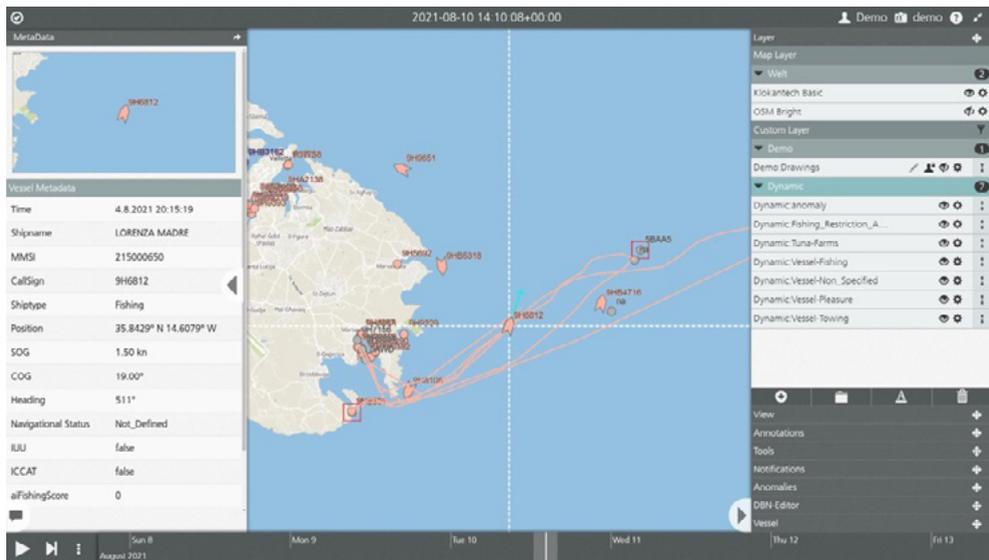


Abb. 11: Der Digitale Logbuch (DigLT). Links: Details eines selektierten Schiffes. Mitte: Kartendarstellung mit AIS-Daten. Rechts: Selektionsmöglichkeiten für verschiedene Karten-Layer, Schiffstypen und weitere Einstellungen. Unten: Zeitleiste zur Navigation.

Ein weiteres bedeutendes Merkmal der Plattform ist die Integration von Neo4j in den DigLT zur Visualisierung von Firmen- und Besitzstrukturen, basierend auf den ORBIS-Daten oder auch anderen möglichen Informationsquellen. Wenn ein Schiff im DigLT identifiziert wird, können neben den Metainformationen auch die zugehörigen Eigentumsstrukturen direkt analysiert werden. Hierbei wird Neo4j im Hintergrund angesprochen, um das Netzwerk der verbundenen Unternehmen und Eigentümer interaktiv darzustellen. Diese Visualisierung ermöglicht es dem Benutzer, die Daten selbst zu erkunden und Verbindungen zwischen Entitäten, wie Firmenstrukturen und Besitzverhältnissen, intuitiv zu erfassen und zu analysieren (siehe Abb. 12).

Durch die Nutzung der Cypher-Query-Language in Neo4j ist es möglich, komplexe Abfragen zu erstellen, die tiefere Einblicke in die Datenstruktur bieten. So können beispielsweise alle Schiffe identifiziert werden, die mit einer bestimmten Person oder Firma in Verbindung stehen. Diese Fähigkeit erlaubt es, detaillierte Use-Cases innerhalb der Daten zu generieren und spezifische Zusammenhänge zu visualisieren, die für die Untersuchung potenziell illegaler Aktivitäten von großer Bedeutung sein können.

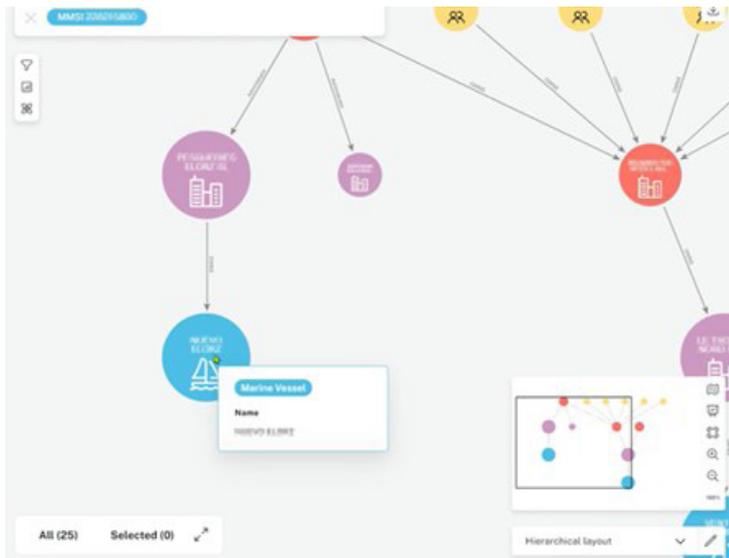


Abb. 12: Visualisierung der Firmenstruktur. Daten aus ORBIS werden in einem interaktiven Graphen dargestellt. Der Nutzer kann selbstständig die Daten und Auffälligkeiten evaluieren.

## 6. Fazit

Zusammenfassend ist ein Tool entstanden, welches die Nachverfolgbarkeit maritimer Aktivitäten ermöglicht und in der Lage ist weitere Hintergrundinformationen zu liefern. Anomalien können über einen Alert gemeldet und dann vom Anwender genauer untersucht werden. Eine Nutzerbefragung hat zudem ergeben, dass der Bedarf nach einer einfachen Lösung hoch ist und viele verschiedene Nutzer sich vorstellen können eine solche Lösung zu nutzen.

Der Lagetisch bietet eine Reihe von Funktionen, die generisch eingesetzt und auch noch erweitert werden können. Eine individuelle, auf verschiedene Bedürfnisse angepasste Lösung, ist möglich. Die erweiterte Funktionalität bietet einen erheblichen Mehrwert, da sie nicht nur die georeferenzierte Analyse von Schiffsbewegungen im DigLT ermöglicht, sondern auch die detaillierte Untersuchung der dahinterliegenden Unternehmens- und Besitzstrukturen. Durch die Kombination dieser beiden Ansätze wird eine umfassendere und tiefere Analyse ermöglicht, die über die bloße Verfolgung von Schiffsbewegungen hinausgeht.

## **Literatur**

[1] Review of Maritime Transport 2019 (unctad.org)

[2] tackling-iiu-fishing\_en-rev-06-2021 (europa.eu)

[3] Thünen: Umsetzung und Auswirkungen der Europäischen Holzhandelsverordnung (thuenen.de)

[4] Illegale Finanzströme : eine Analyse und erste Handlungsempfehlungen (fes.de)

[5] GFCM-GSAs-Statistical-Grid.pdf (fao.org)

## **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. Pilller 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), 355 Seiten  
ISBN 978-3-95806-798-1