



STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2022

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER JÜLICH

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

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

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

Alle Vorhaben, zu denen im vorliegenden Band Beiträge veröffentlicht sind, wurden im 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
Internet www.fz-juelich.de/zb

Satz und Layout

Projektträger Jülich

Bildnachweis

©DEME Group

Schriftenreihe Projektträger Jülich

ISBN 978-3-95806-673-1

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

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

STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2022

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER JÜLICH

VORWORT

Die maritime Wirtschaft in Deutschland wird seit Jahren geprägt von einem tiefgreifenden Wandel. Neben der fortschreitenden Digitalisierung und neuen Sicherheitsaspekten muss die Branche schnellstmöglich die Weichen für die größte Herausforderung stellen - die Dekarbonisierung der Schifffahrt. Bis spätestens 2050 wollen wir in Europa klimaneutral auf den Meeren unterwegs sein.

Das Erreichen der maritimen Klimaziele erfordert große wirtschaftliche und technologische Kraftanstrengungen. Andererseits können die strengen Klimaregeln den Werften und ihren Zulieferern, der Hafenwirtschaft und der meeres-technischen Industrie auch einen neuen Schub verleihen. Denn die maritime Branche ist hierzulande auf Hochtechnologie-Produkte spezialisiert und kann dieses Know-how einbringen, um die Schifffahrt grüner und nachhaltiger zu gestalten.

Die Zukunftsfragen in Bezug auf Energiewende, Klimaschutz und Rohstoffversorgung erfordern eine strukturell starke und innovative maritime Wirtschaft. Daher wird die Bundesregierung die anwendungsorientierte Forschungsförderung im Maritimen Forschungsprogramm weiter ausbauen. Für die Entwicklung grüner Technologien stellen wir ab 2023 zusätzliche 30 Millionen Euro Fördermittel jährlich bereit.

Der Weg zum klimaneutralen Schiff spielt auch auf der Statustagung „Maritime Technologien“ eine zentrale Rolle. Dort werden wir uns unter anderem über klimafreundliche Kraftstoffe und Antriebstechnologien austauschen und wollen einen starken Impuls in die Branche aussenden. Zudem wird sich eine weitere Podiumsdiskussion mit dem Thema Munition im Meer befassen. Mit Spannung erwarte ich auch die Fachvorträge auf der etablierten Konferenz, die einmal mehr aufzeigen, wie aus Visionen und Ideen marktfähige Produkte entstehen, mit denen die Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskompetenz der maritimen Wirtschaft gestärkt wird.

Deshalb lade ich Sie dazu ein, sich aktiv in die Statustagung in Berlin einzubringen und zu aktuellen Fragen der Forschung und Entwicklung zu diskutieren.

Ich freue mich auf den Dialog mit Ihnen!

Claudia Müller

INHALTSVERZEICHNIS

DIOMAR

15

DICKBLECHSCHWEISSEN MITTELS HÖCHSTLEISTUNGS-
DIODENLASER FÜR MARITIME ANWENDUNGEN

DIPL.-ING. OLIVER SEFFER
DIPL.-ING. SARAH NOTHDURFT
ALEXANDER HILCK, M. SC.
DIPL.-PHYS. JÜRGEN WALTER
DR. RER. NAT. MICHAEL HUSTEDT
DR.-ING. SFI JÖRG HERMSDORF
PROF. DR.-ING. STEFAN KAIERLE
MARVIN DRÖSSER, MBA
DIPL.-ING. (FH) FRANK BOEKHOFF
DIPL.-ING. (FH) JÖRG MALCHUS
DIPL. ING. VOLKER KRAUSE
DIPL.-ING. JENS HUSSLEIN

ENDURE

35

ENERGIEEINSPARUNG DURCH DIE NUTZUNG DER
RUDERKRAFT IM AUTOPILOTEN

ARNE BROCKSTÄDT
JOCHEN HUNDEMER
HENDRIK SCHWAB

EXTENSE

45

ENTWICKLUNG EINES MESSSYSTEMS (MULTISENSORPLATTFORM)
ZUR DETEKTION UND ORTUNG VON OBJEKTEN IN SEDIMENTEN

DIPL.-ING. GERD SEIDEL
DR. SUSAN MAU
PROF. DR.-ING. HORST HELLBRÜCK
SVEN OLE SCHMIDT M. SC.
DIPL.-ING. FABIAN JOHN
DR. CLAUDIUS BACHMANN
ELENA NUNNENMANN M. SC.

TSCHALL

59

TIEFFREQUENTE SCHALLABSTRAHLUNG
VON MASCHINENGERÄUSCHEN INS WASSER

DR.-ING. DIETRICH WITTEKIND
DIPL.-ING., MBA THOMAS BÜCHLER
M. SC. JOHANNA DANIEL
DIPL.-ING. MAX SCHUSTER

SCIPPER

73

SCHLEUSENASSISTENZSYSTEM BASIEREND AUF
PPP UND VDES FÜR DIE BINNENSCHIFFFAHRT

DR. ALEXANDER LUTZ
DR. MICHAEL SCHRÖDER
JÜRGEN ALBERDING
DR. RALF ZIEBOLD
DR. RONALD RAULEFS
DR. MARTIN SANDLER
JÜRGEN ZIMMERMANN
MICHAEL HOPPE

DIGILECK 4.0

95

DIGITALE LECKSTABILITÄT

DR.-ING. ADELE LÜBCKE
PROF. DR.-ING. STEFAN KRÜGER
DR.-ING. HENDRIK VORHÖLTER
JONAS WEHLING, M. SC.

EcoCab

109

DIE AUTARKE UND NACHHALTIGE NIEDRIGENERGIEKABINE

SVENJA WÜSTERMANN
DR.-ING. BENEDIKT HOLBEIN
KURT SOMMER
KAMILA SZWEJK
PROF. DR. MICHAEL BRAUNGART
MAREIKE SUNDERMANN
DR. PATRICK SCHWAGER
HEINZ BEKEBROK

MAREIKE TIPPE
ELIAS JORDAN
KATRIN LENZ
TOBIAS SCHÖNER
M. SC. SUKHJOT KLER YOUNG
CARSTEN HAELING
DR.-ING. PETER MÖSLE
DR. JAN VON DEN LANCKEN

PRESEA

133

ECHTZEITBASIERTE SEEVERKEHRSVORHERSAGE

DR. DANA MEISSNER
MARCUS CHRISTOPHER ASTER
DR. CARSTEN HILGENFELD
DIEGO PIEDRA-GARCIA

DNH

143

ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN SYSTEMS FÜR
DRUCKNEUTRALE HOCHSPANNUNGSANLAGEN

MANUEL HÜBNER
GERHARD KÖRNER
STEFAN ESSIG
AHMET F. KILINC
FELIX HÖHNLE
HIKMET GUENEGRI
ANNA TOK
WIDA SAYAR
DAVID BRANDT
PROF. WILFRIED ATTENBERGER
DR. YVONNE HABA
DR. SARAVNAKUMA ARUMUGAM
SASCHA KROHMANN
PROF. SASCHA KOSLECK
ROGHIEH SRADAT
MARIUS BEKKER
PETRUS PIETERSE
PROF. DIRK UHRLANDT

SeaFeather10k

157

SEA FILTER AND EXTRAFINE PARTICLE SAMPLER AS A TETHERED SYSTEM
FOR THE DEEP AND HADAL ZONES OF THE OCEAN (10.000 M)

DIPL.-PHYS. ANDREAS HECKEL

DR. RER. NAT. JOHANNES KÄSSBOHRER

DR. RER. NAT. FRANZISKA NEHRING

DR. RER. NAT. WALTER GEIBERT

M. SC. DENNIS KÖHLER

RETROLADUNG

169

LAGEBILDOPTIMIERUNG FÜR MARITIME AWARENESS

FLORIAN EBERL

JOSEF FEMBÖCK

GYDE ANDRESEN-PAULSEN

SIMON HABERL

OLE DETLEFSEN

SÖREN EHLERS

MOUSTAFA ABDEL MAKSOUH

CARL REINER

CORDULA AHLERS

LENNART HORSTMANN

A-SWARM

189

AUTONOME ELEKTRISCHE SCHIFFFAHRT AUF WASSERSTRASSEN
IN METROPOLENREGIONEN

DR.-ING. CHRISTIAN MASILGE

PROF. DR.-ING. TORSTEN JEINSCH

DR. BJÖRN KOLEWE

PROF. DR.-ING. GERD HOLBACH

TIM HOLZKI

GERALD RYNKOWSKI

KLAUS-GÜNTER LICHTFUSS

DR. CHRISTIAN MEYNE

KAY BIERZYNSKI

OSCAR

201

ONLINE MODELING, SIMULATION AND REMOTE CONTROL SYSTEM
FOR ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES ON-BOARD (CRUISE) SHIPS

MALTE ZERETZKE
TOBIAS KAULFUSS
PROF. DR.-ING. STEPHAN KÖSTER
DAGMAR POHL
THORSTEN ARENDT

PSDMan

213

UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VON PRE-SWIRL
DUCTS/VORDRALDÜSEN AUF DIE MANÖVRIEREIGENSCHAFTEN
VON VÖLLIGEN SCHIFFEN

PROF. DR.-ING. MOUSTAF ABDEL-MAKSOUND
CENG STEVE LEONARD
DIPL.-ING. LARS LÜBKE
M.SC. PATRICK SUMISLAWSKI
M.SC. MBA AHMED SAHAB
M.SC. ARNE BROCKSTÄDT

FOULLAS

229

FOULINGENTFERNUNG VON MARITIMEN OBERFLÄCHEN
MITTELS LASERSTRAHLUNG UNTER WASSER

STANISLAV ZIMBELMANN
DR.-ING. BENJAMIN EMDE
DR.-ING. JÖRG HERMSDORF
TIM HEUSINGER VON WALDEGGE
DR. DOROTHEA STÜBING
DR.-ING MARKUS BAUMANN

HYDESIGN

HYBRIDE SIMULATIONSVERFAHREN IM ENTWURFSPROZESS
VON ENERGY SAVING DEVICES UND PROPELLERN

239

LUTZ KLEINSORGE
PASCAL ANSCHAU
STEVE LEONARD
SINA SAMARBAKHS
NIKOLAI KORNEV
ERIC EBERT
NILS DAMASCHKE

EnviSim4Mare

REALISIERUNG EXPERIMENTELLER UNTERSUCHUNGEN
VON LEBENDEM MARINEM BEWUCHS AN OFFSHORE-
WINDENERGIEANLAGEN DURCH DIE ERRICHTUNG DES
SALZWASSER-WELLEN-STRÖMUNGSKANALS

249

PROF. DR.-ING. HABIL. NILS GOSEBERG
DR.-ING. DAVID SCHÜRENKAMP
DR.-ING. CONSTANTIN SCHWEIGER
CLEMENS KRAUTWALD, M.SC.
PROF. DR. BELA H. BUCK
DR. WOLF ISBERT
CONSTANTIN LINDEMANN, M.SC.
DIPL.-ING. ALBRECHT VICTOR
DIPL.-ING. SEBASTIAN KELMA
ALEXANDER LOWAG

EASE

KI-BASIERTE ASSISTENZ FÜR FORENSISCHE
ERMITTLUNGEN AUF SEE

265

SONJA SIEVI
DR. BERTRAM WORTELEN
M. SC. CHRISTINA TSIROGLOU
DR. SILVIA FOERDERREUTHER
MAYBRITT MEYER
OLIVER PFEIFFER

MethMARE

EMISSIONEN IN DER SCHIFFFAHRT MIT NEUARTIGEN
GASMOTOREN VERRINGERN

279

ANDREA PROSPERO

SIMON HETTIG

DIOMAR

DICKBLECHSCHWEIßEN MITTELS HÖCHSTLEISTUNGS-DIODENLASER
FÜR MARITIME ANWENDUNGEN

AUTOREN

DIPL.-ING. OLIVER SEFFER	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
DR.-ING. SARAH NOTHDURFT	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
ALEXANDER HILCK, M. SC.	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
DIPL.-PHYS. JÜRGEN WALTER	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
DR. RER. NAT. MICHAEL HUSTEDT	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
DR.-ING. SFI JÖRG HERMSDORF	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
PROF. DR.-ING. STEFAN KAIERLE	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
MARVIN DRÖSSER, MBA	MEYER WERFT GMBH & CO. KG
DIPL.-ING. (FH) FRANK BOEKHOFF	MEYER WERFT GMBH & CO. KG
DIPL.-ING. (FH) JÖRG MALCHUS	LASERLINE GMBH
DIPL.-ING. VOLKER KRAUSE	LASERLINE GMBH
DIPL.-ING. JENS HUSSLEIN	HELD SYSTEMS GMBH

1. EINLEITUNG

Für die europäische Industrie stellen hocheffiziente Fertigungstechniken eine Grundvoraussetzung dar, um auf Dauer wettbewerbsfähig zu bleiben. Eine permanente Steigerung der Produktivität ist daher auch für deutsche Unternehmen auf dem Gebiet der maritimen Anwendungen eine Notwendigkeit, da dies zu einer signifikanten Reduzierung der Herstellungskosten führt. Damit kann ein Wettbewerbsvorteil erreicht werden, der im Hinblick auf den Wettbewerbsdruck, der vor allem durch Mitbewerber aus Asien immer stärker in den Vordergrund rückt, von entscheidender Bedeutung ist.

Neben konventionellen Lichtbogenschweißverfahren kommen derzeit im maritimen Bereich auch Laserstrahl-Lichtbogen-Hybridschweißverfahren für die existierenden Fügeaufgaben zum Einsatz. Im Bereich hoher Stahlblechdicken oberhalb von 12 mm konnten allerdings in den letzten Jahrzehnten keine neuen Schweißverfahren etabliert werden, sodass gerade hier ein erheblicher Bedarf an innovativen effizienten Fügetechnologien existiert. Relevante Nachteile des Lichtbogenschweißens, die mit einer zunehmenden Materialstärke deutlich zunehmen, sind vergleichsweise geringe Einschweißstiefen, die mehrlagige Prozesse erfordern, sowie relativ geringe Schweißgeschwindigkeiten [1], die zu ausgedehnten Wärmeeinflusszonen, Werkstückverzügen und folglich langen Fertigungszeiten sowie hohen Kosten für erforderliche Nacharbeiten führen [2]. Für das zweiseitige oder mehrlagige Unterpulverschweißen (UP-Schweißen) ist außerdem ein großer

Handhabungsaufwand zu verzeichnen. Weiterhin weisen Lichtbogenschweißverfahren generell einen relativ hohen Zusatzwerkstoffverbrauch auf, der mit zunehmender Materialstärke stärker ansteigt.

Im Gegensatz zu mehrlagigen Lichtbogenschweißverfahren ermöglicht das Laserstrahlschweißen höhere Schweißgeschwindigkeiten sowie einen stärker konzentrierten und in Summe geringeren Wärmeeintrag in Kombination mit höheren Einschweißstiefen und reduzierten Richtaufwänden [1]. Jedoch erfordert das Laserstrahlschweißen bislang auch geringe Positionstoleranzen, was den Einsatz aufwendiger Spanntechnik und Verfahrereinheiten (hohe Investitionen) bedingt [1]. Zudem ist die Überbrückbarkeit von Spalten und Kantenversätzen beim Laserstrahlschweißen aufgrund üblicher geringer Fokusbereichsdurchmesser bzw. schlanker Strahlprofile in der Fügezone stark limitiert [3]. Dies stellt gerade bei der Verarbeitung dickwandiger Bauteile ein Problem dar, da sämtliche Bauteile Fertigungstoleranzen aufweisen, die mit zunehmender Dicke üblicherweise größer werden. Bisher verhindern die hohen Anforderungen eine wirtschaftliche Nutzung, weil die im Schiffbau typischen Fügekantenqualitäten und Spaltmaße gerade im Dickblechbereich mittels reiner Laserstrahlschweißprozesse nicht gefügt werden können [4].

Das Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen wurde im Schiffbau (als eine der ersten Branchen) im Bereich der Kreuzfahrt- und Passagierschiffe zum Fügen großflächiger Deckstrukturen aus Schiffbaustahl [5, 6] erfolgreich eingesetzt. Grundsätzlich können mit einem Hybrid-schweißprozess im Vergleich zu reinen Laserstrahlschweißprozessen größere geometrische Fertigungstoleranzen hinsichtlich Spaltmaß und Kantenversatz überbrückt werden [7]. Zugleich werden aufgrund der hohen Energiedichte der Laserstrahlung hohe Schweißgeschwindigkeiten, hohe Einschweißstiefen, kleine Wärmeeinflusszonen und geringe Schweißverzüge erreicht [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Insgesamt konnte der Nachweis des profitablen Schweißens von Schiffbaukomponenten mit Hilfe des Laserstrahl-MSG-Hybridschweißverfahrens erbracht werden, jedoch sind bis heute, auch in aktuellen Forschungsprojekten, hierfür weiterhin hohe Fügekantenqualitäten sowie aufwendige Spanntechniken erforderlich und Einschränkungen bzgl. der Blechdicken bestehen [14]. Bei Erhöhung der Blechdicke steigt der schmale, laserdominierte Bereich der Schweißnaht an, wodurch die Spaltüberbrückbarkeit in diesem Bereich sinkt und das Risiko der Bildung von Flankenbindefehlern steigt. Zudem ist eine verringerte Prozessstabilität mit zunehmender Blechdicke zu verzeichnen. Neben einer Abnahme der Prozessstabilität nimmt mit zunehmender Blechdicke die Ausbildung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten, insbesondere von Heißrissen, aufgrund des hohen Aspektverhältnisses von Einschweißtiefe zu Nahtbreite zu [13, 15, 16]. Die einlagig, maximal zu schweißenden Blechstärken sind industriell bisher auf weniger als 15 mm beschränkt.

Die bei hohen Blechdicken und plasmageschnittenen Kanten resultierenden Spaltbreiten und Kantenversätze zwischen den Fügepartnern könnten, zur Überwindung der Nachteile laserstrahlbasierter Fügeverfahren, mit entsprechend großen Strahldurchmessern gefügt werden. Dabei würden jedoch die Intensitäten für die Laserstrahlung entsprechend stark abnehmen, wodurch erforderliche Einschweißstiefen nicht mehr erzielt werden

können. Diese Problemstellung konnte mittels der im Verbundvorhaben geplanten sehr hohen Laserstrahlleistung von bis zu 60kW sowie der geplanten Fokusdurchmesser von bis zu 4 mm der seitens der Laserline GmbH (LL) zu entwickelnden Höchstleistungs-Laserstrahlquellen und Schweißoptiken überwunden werden, sodass bei hohen Strahldurchmessern ausreichend hohe Intensitäten vorliegen. Dadurch wird für Blechdicken oberhalb von 15 mm eine wirtschaftlichere Lösung für hochwertige Verbindungen bei hohen Schweißgeschwindigkeiten mittels Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlschweißen, als robustes reines Laserstrahlschweißverfahren, in Aussicht gestellt. Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden Prozessentwicklungen zum Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlschweißen für einen Blechdickenbereich von 5 mm bis 30 mm durchgeführt.

Die Entwicklung entsprechender Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlschweißprozesse erfordert die Entwicklung von Konzeptionen zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs der neuen Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlquelle zum Schutz der Beschäftigten, nicht nur im Hinblick auf die sehr hohen Intensitäten der Laserstrahlung und der aus der Prozesszone freigesetzten Sekundärstrahlung, sondern auch unter Berücksichtigung der erwarteten großen Mengen potentiell gefährlicher Gefahrstoffemissionen, sowie zum Schutz der Umwelt. Erst unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Sicherheitskonzeption hinsichtlich potentieller Gefährdungen durch vagabundierende und gestreute Primär- und Sekundärstrahlung und durch freigesetzte Gefahrstoffe sowie mit den abgeleiteten Schutzmaßnahmen lässt sich das Schweißverfahren in industriellem Maßstab sinnvoll umsetzen.

2. ENTWICKLUNG VON HÖCHSTLEISTUNGS-DIODENLASERSTRAHLQUELLEN MIT 60KW AUSGANGSLEISTUNG FÜR SCHWEIßANWENDUNGEN IM SCHIFFBAU

Zu Beginn des Forschungsvorhabens waren Diodenlaserstrahlquellen mit optischen Ausgangsleistungen oberhalb von 25kW sowie die zur Führung der Laserstrahlung von der Strahlquelle zur Anwendung benötigte Lichtleitfaser und Bearbeitungsoptiken für den industriellen Einsatz nicht verfügbar.

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden zwei Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlquellen sowie die benötigte Systemtechnik (Lichtleitfaser und Bearbeitungsoptiken) konzipiert und realisiert. Mit der ersten Strahlquelle wurde eine optische Leistung von 40,9kW bei einem Wirkungsgrad von 43,2% erzielt. Auf Grundlage der, bei der Realisierung dieser Strahlquelle, gesammelten Erfahrungen erfolgte die Konzeptionierung und Realisierung der zweiten Strahlquelle (vgl. Abb. 1).

Die emittierte Laserstrahlleistung der zweiten Strahlquelle konnte auf 58,9kW, bei gleichzeitiger Erhöhung des Wirkungsgrades auf 46,6%, gesteigert werden. Die Strahlqualität beider Strahlquellen beträgt $200\text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Die Entwicklungsarbeiten zur Strahlführung und Strahlformung waren ebenfalls erfolgreich. Nach mehreren Überarbeitungsiterationen wurde eine Lichtleitfaser entwickelt, die erfolgreich die Lasersicherheitszertifizierung

bestanden hat und für den dauerhaften Einsatz mit einer Laserstrahlleistung von bis zu 60kW freigegeben ist. Die Bearbeitungsoptiken zeigten eine sehr gute Anwendbarkeit bei den Verbundpartnern Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) und MEYER WERFT GmbH & Co. KG (MW).



Abb. 1: 60kW Diodenlaserstrahlquelle

Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlquellen und Systemtechnik haben die dauerhafte Einsatzfähigkeit im Wertumfeld erfolgreich unter Beweis gestellt. Aus Sicht von LL konnten alle Projektziele erfolgreich erreicht werden. Die Entwicklungsarbeiten werden in [17] ausführlich dargestellt.

3. ENTWICKLUNG VON HÖCHSTLEISTUNGS-DIODENLASERSTRAHL-SCHWEIßPROZESSEN

Im Rahmen der Schweißprozessentwicklung wurden Höchstleistungs-Diodenlaserstrahl-schweißprozesse in drei grundlegenden Iterationsstufen entwickelt. Zu Beginn wurde das Laserstrahlschweißen mit einer freien Wurzel untersucht. Dabei wurde u. a. an einer Blechdicke von 22 mm ermittelt, dass bei einer nicht ausreichend hohen Streckenenergie eine Einschweißung resultiert (vgl. Abb. 2, links) und infolge der verhältnismäßig großen Schmelzbäder bei einer Durchschweißung ein vollständiger Austritt der Schmelze aus der Fügezone eintritt, sodass eine Schnitffuge resultiert (vgl. Abb. 2, rechts). In weiteren Untersuchungen wurde evaluiert, dass bei einer Steghöhe von 6 mm gute Schweißnaht-wurzeln erzielt werden, bei einer Erhöhung der Steghöhe auf 10 mm die Wurzel-ausprägung jedoch durch eine hohe Ungleichmäßigkeit und partielle Tropfenbildung gekennzeichnet ist.

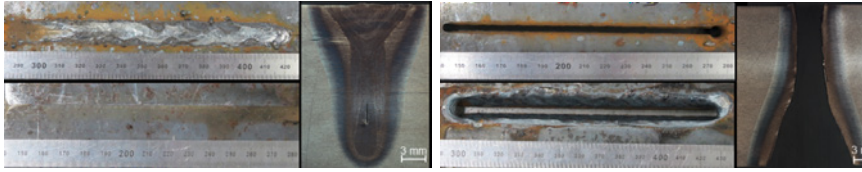


Abb. 2: Aufnahmen von exemplarischen Schweißnahtober- und unterseiten sowie Querschliffe von Schweißnähten, die mit einer Schweißgeschwindigkeit von 0,5 m/min (links) bzw. 0,3 m/min (rechts) erzeugt wurden: Blechdicke 22 mm, Laserstrahlleistung 30,7 kW, Fokusbereich 2,7 mm, Fokusbereich 0 mm (Blechoberseite)

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die zweite grundlegende Iterationsstufe abgeleitet, die einen Wurzellagenschweißprozess mit einer hohen Strahlqualität und einen Fülllagenschweißprozess mittels Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlquelle beinhaltet. Im Rahmen der Untersuchungen zur Entwicklung des Fülllagenschweißprozesses konnten Füllgrade für Fasenhöhen bis ca. 18 mm erzielt werden und bei einem Breiten-Tiefen-Verhältnis > 1 wurden rissfreie Fülllagen erzielt (vgl. Abb. 3).

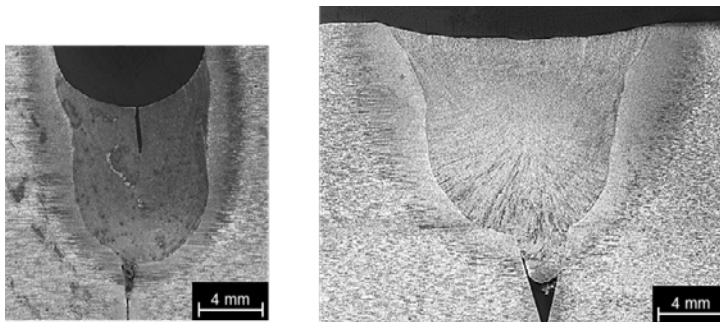


Abb. 3: Aufnahmen von exemplarischen Querschliffen von Schweißnähten, die mit einer Streckenenergie von 2.400 kJ/m und einer Schweißgeschwindigkeit von 0,75 m/min (links) sowie mit einer Streckenenergie von 7.200 kJ/m und einer Schweißgeschwindigkeit von 0,25 m/min (rechts) erzeugt wurden: Laserstrahlleistung 30 kW, Fokusbereich -50 mm

Als dritte grundlegende Iterationsstufe wurde das Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlschweißen unter Einsatz einer Schmelzbadsicherung untersucht. Hierbei wurde zu Beginn die Auslegung der Schmelzbadsicherung hinsichtlich Material (Pulver, Keramik, Kupfer) und Geometrie (Nutbreite, Pulverschichtdicke) untersucht. Weiterhin wurden die Einflüsse grundlegender Prozessparameter (Streckenenergie [Laserstrahlleistung, Schweißgeschwindigkeit], Fokusbereich, Strahlkaustik, Fokusbereich, Drahtvorschubgeschwindigkeit, Blechdicke, Schnittkantenqualität [plangefräst, plasmageschnitten], Spaltbreite, Anordnung Drahtzufuhr, Kantenvorbereitung) auf die resultierende Schweißnaht (Geometrie [Einschweißtiefe, Schweißnahtbreite], Wärmeeinflusszone, Wurzelprägung, Schweißnahtunregelmäßigkeiten) ermittelt. Für die verschiedenen Blechdicken (15 mm, 20 mm, 22 mm, 25 mm, 30 mm) wurden jeweils die individuellen Prozessparameter entwickelt. Abb. 4 zeigt eine exemplarische Aufnahme eines Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlschweißprozesses mit einer Laserstrahlleistung von 56 kW.

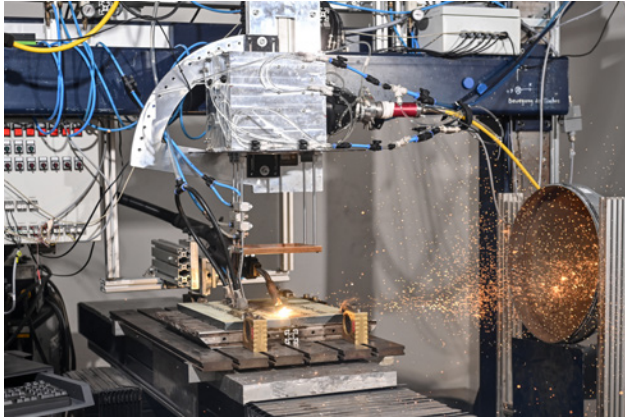


Abb. 4: Exemplarische Aufnahme eines Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlschweißprozesses mit einer Laserstrahlleistung von 56 kW

Für die Blechdicken 15 mm und 22 mm wurden am LZH auf Schweißnahtlängen von 500 mm Prozessparametersätze entwickelt, mit welchen, unter Ausnahme der Ein- und Auslaufbereiche, gemäß Durchstrahlungsprüfung und metallographischer Analyse rissfreie Schweißverbindungen erzeugt werden (vgl. Abb. 5).

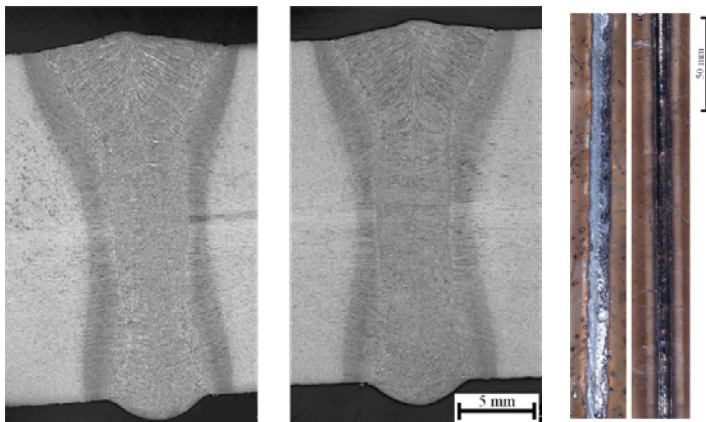


Abb. 5: Aufnahmen von exemplarischen Querschliffen von Schweißnähten (links und mittig) sowie von Schweißnahtober- und unterseite (rechts): Blechdicke 22 mm, Laserstrahlleistung 40 kW, Schweißgeschwindigkeit 0,72 mm, Fokusbildung 12 mm (oberhalb der Blechoberseite), Drahtvorschub 5 m/min

Entsprechende Schweißverbindungen mit einer Blechdicke von 22 mm wurden weiterhin einer Schwingfestigkeitsprüfung unterzogen. Für die Nennspannungsbewertung wurde die Kraftamplitude auf die Prüfquerschnittsfläche bezogen. Auf dieser Basis erfolgte eine Gegenüberstellung mit den Kerbfällen für Stumpfnähte aus der DNV Class Guideline DNV-CG-0129 [18] und den IIW-Empfehlungen [19]. Die Nennspannungsamplituden aller Versuchsergebnisse lagen dabei oberhalb von FAT 80 und ausgenommen von einem Ergebnis erfüllen die Ergebnisse zudem FAT 90 (vgl. Abb. 6).

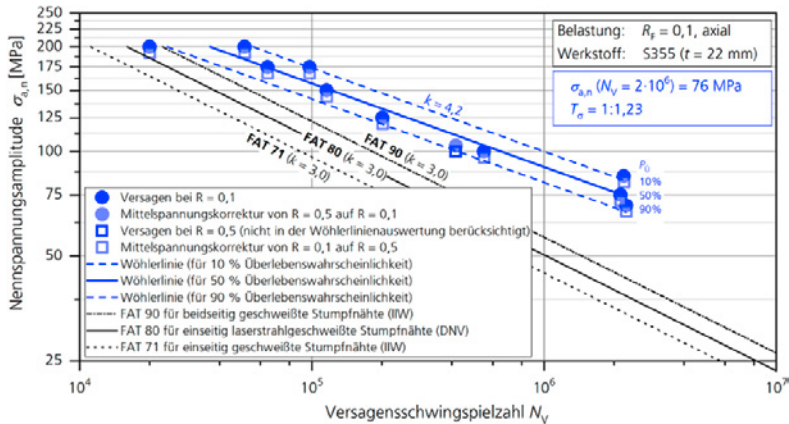


Abb. 6: Nennspannungsbewertung der Versuchsergebnisse gegenüber DNV-CG-0129 [18] und IIW [19]

Der für eine Blechdicke von 30 mm entwickelte Schweißprozess zeigt ein sehr großes Potential, jedoch weisen die Schweißverbindungen partiell über der Nahtlänge Heißrisse auf (vgl. Abb. 7), sodass insbesondere für diesen Blechdickenbereich weiterhin Forschungsbedarf in Bezug auf die Vermeidung bzw. Reduzierung von Rissen besteht.

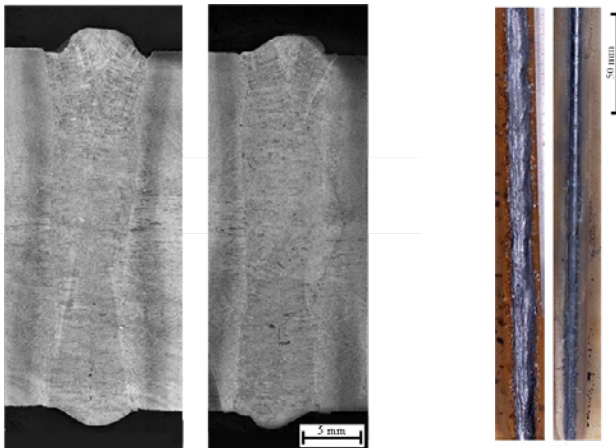


Abb. 7: Aufnahmen von exemplarischen Querschliffen von Schweißnähten (links und mittig) sowie von Schweißnahtober- und -unterseite (rechts): Blechdicke 30 mm, Laserstrahlleistung 40 kW, Schweißgeschwindigkeit 0,50 m/min, Fokusslage 0 mm (Blechoberseite), Drahtvorschub 2,5 m/min

Aufbauend auf den Untersuchungen am Stumpfstoß wurden weiterhin Schweißuntersuchungen am T-Stoß durchgeführt. Für die Blechdicken von 22 mm und 30 mm wurden Schweißprozessparameter für einlagige Kehlnähte ohne den Einsatz einer Schmelzbad-sicherung entwickelt (vgl. Abb. 8) und die Einflüsse unterschiedlicher Prozessparameter auf die resultierende Schweißnahtausprägung (Einschweißtiefe, Nahtbreite, Wärmeeinflusszone, Schweißnahtunregelmäßigkeiten) untersucht.

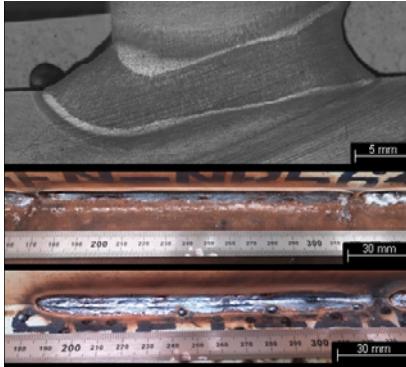


Abb. 8: Aufnahmen eines exemplarischen Querschliffes (oben), einer Schweißnahtoberseite (mittig) und einer -wurzel (unten) einer Kehlnaht: Blechdicke 22 mm, Laserstrahlleistung 56 kW, Schweißgeschwindigkeit 1,0 m/min, Fokusslage 0 mm (Blechoberseite), Einstrahlwinkel 15°

Die Details der Schweißuntersuchungen sowie der unterschiedlichen Schweißprozessentwicklungen werden in [20] ausführlich dargestellt.

4. EVALUIERUNG VON LASERSICHERHEIT, PROZESSEMISSIONEN UND GEFÄHRSTOFFEXPOSITIONEN

Die durchgeführten Untersuchungen zur Evaluierung von Lasersicherheit, Prozessemissionen und Gefahrstoffexpositionen belegen, dass die sich aus dem Schweißen dicker Stahlbleche mit Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlung ergebenden Gefährdungen für die Beschäftigten und die Umwelt hochgradig relevant sind und daher effiziente Schutzmaßnahmen ergriffen werden müssen.

Gegen die aus der Prozesszone gestreute Strahlung (vgl. Abb. 9) sowie die UV-Sekundärstrahlung muss eine geeignete lokale Abschirmung (vgl. Abb. 10) installiert werden. Diese muss optisch dicht und hinreichend widerstandsfähig sein und sollte von der Prozesszone einen Abstand von wenigstens einem halben Meter haben, um die thermische Belastung nicht zu groß werden zu lassen. Wichtig ist die Adaption einer aktiven Kühlung mit hinreichender Kühlleistung zur Abfuhr der aus dem Prozess in die Abschirmung eingetragenen Energie entsprechend einer Strahlungsleistung von mehreren Kilowatt. Verringert werden kann die Erwärmung der Abschirmung zusätzlich durch Steigerung des Emissionsgrades an der Außenseite der Abschirmung z. B. mittels Dunkelfärbung, weil dann ein höherer Energieanteil nach außen abgestrahlt wird. Nicht vermeidbar ist, dass zwischen der Abschirmung und den zu fügenden Blechen ein Restspalt verbleibt, damit der Schweißkopf über die Bleche bewegt werden kann. Der Spalt muss so klein wie technisch möglich gehalten werden. Zu empfehlen ist die Blockierung ggf. austretender Streustrahlungsanteile durch Borsten z. B. aus thermisch stabilen Carbonfasern, die über die Bleche gezogen werden können.

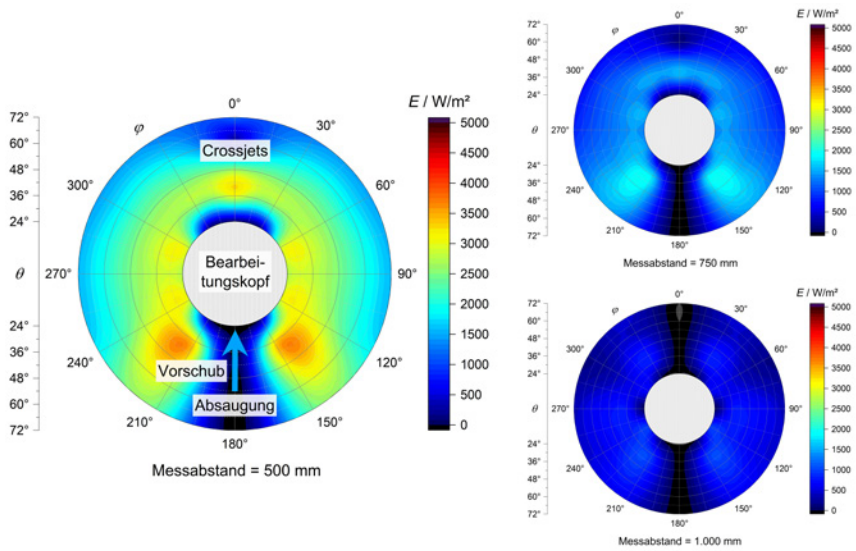


Abb. 9: Polarkonturdiagramme zur Visualisierung der räumlichen Verteilung der Bestrahlungsstärke in W/m^2 , die aus einem Schweißprozess mit Schmelzbadsicherung (Keramik + Pulver) ohne Drahtzufuhr emittiert wurde (Laserstrahlleistung 56 kW, Vorschubgeschwindigkeit 0,9 m/min, Fokusslage 20 mm)

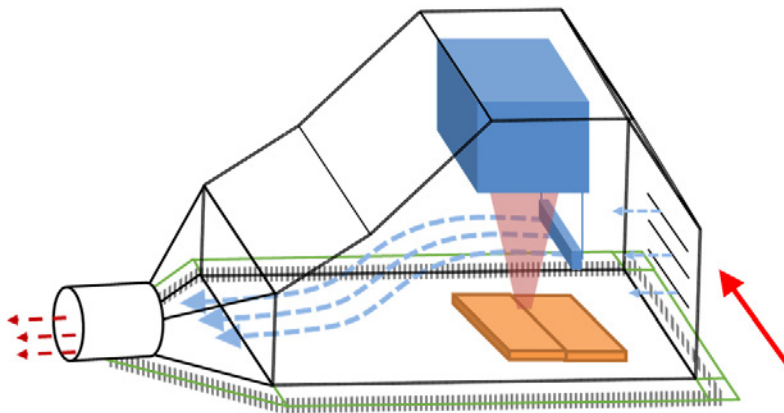


Abb. 10: Vorschlag für die prinzipielle Auslegung einer lokalen Abschirmung aus Blechen einer Aluminiumlegierung zur Limitierung der Ausbreitung von Streustrahlung und UV-Sekundärstrahlung. Der durchgezogene hellrote Pfeil gibt die Vorschubrichtung des Bearbeitungskopfes zusammen mit der Abschirmung an. Die gestrichelten hellblauen Pfeile bezeichnen die Richtung des einströmenden Gases (Crossjet-Strömung sowie Zuluft), die gestrichelten dunkelroten Pfeile veranschaulichen die Abluftströmung.

Generell ist für eine in industriellem Rahmen zu betreibende Laserstrahlschweißanlage angesichts der großen von der Quelle emittierten optischen Leistung (vgl. die Berechnung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlungsstärke *VMB* in Abb. 11) die unkontrollierte Propagation von direkter oder reflektierter Strahlung mittels technischer Maßnahmen auszuschließen. Für die direkte Laserbestrahlung wurde ein Augensicherheitsabstand *NOHD* von mehreren Hundert Metern abgeschätzt.

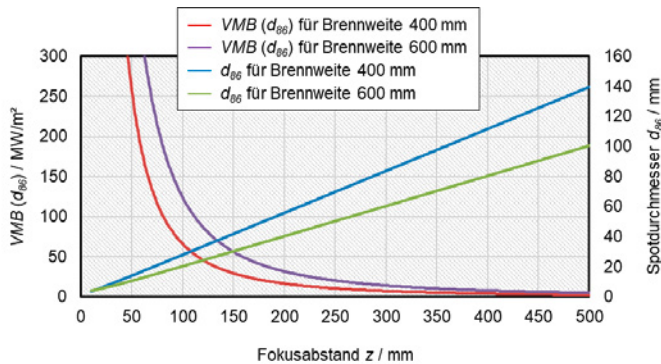


Abb. 11: Berechnete vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärken VMB und Laserspotdurchmesser d_{90} als Funktion des Abstands z zwischen Fokusebene und bestrahlter Oberfläche für eine Laserstrahlleistung von 40,7 kW bei einem Faserkerndurchmesser von 2 mm, einer Kollimationsbrennweite von 300 mm sowie einer Fokussierbrennweite von 400 mm bzw. 600 mm

Auch für die Streustrahlung ergibt sich ausgehend von den durchgeführten Messungen ein *NOHD*-Wert von wenigstens 5,8 m. Um die Laserklasse 1 gemäß DIN EN 60825-1 erreichen zu können, ist die Überschreitung der maximal zulässigen Bestrahlung für das Auge gemäß DIN EN 60825-1 bzw. des Expositionsgrenzwertes für das Auge gemäß Richtlinie 2006/25/EG mit technisch-konstruktiven Maßnahmen ohne menschlichen Eingriff während der kompletten Arbeitsschicht sicher zu verhindern, d. h. die Anlage muss eigensicher sein. Sofern der Fehlerfall einer direkten Laserbestrahlung der lokalen Abschirmung nicht auszuschließen ist, lässt sich die Eigensicherheit nur mittels komplett aktiver Abschirmung realisieren, welche die Laserstrahlung oberhalb einer definierten Schwelle umgehend über die Lasersicherheitssteuerung abschaltet. Dieses System kann durch Strahlungssensoren zur Detektion gestreuter Laserstrahlung oberhalb des Expositionsgrenzwertes für das Auge, die durch den Spalt am unteren Rand der Abschirmung tritt, ergänzt werden. Im Fall von T-Stoß-Schweißungen, bei denen die Strahlung evtl. nicht auf den Hallenboden oder eine Strahlfalle gerichtet werden kann, ist ein Durchtritt von Laserstrahlung an der Schweißnahtunterseite ebenfalls mittels einer aktiven Abschirmung abzusichern. Diese Untersuchungen werden in [20, 21] detailliert dargestellt.

Aus den durchgeführten Messungen zur Freisetzung von Gefahrstoffen aus der Laserprozesszone (vgl. Abb. 12) ergibt sich, dass eine möglichst vollständige Gefahrstoffefassung und -absaugung nahe der Prozesszone erforderlich ist, um eine großräumige Verteilung der Schweißrauche im Arbeitsbereich zu vermeiden. Dabei spielen die aus dem organischen Primer stammenden organischen Komponenten lediglich eine untergeordnete Rolle (vgl. Tab. 1).

Als vorteilhaft erweist sich die Notwendigkeit der Installation der lokalen Strahlungsabschirmung (vgl. Abb. 10). Diese Abschirmung kann gleichzeitig als Umhausung dienen, welche die großräumige Ausbreitung der Schweißrauche verhindert. Aus der Abschirmung wird dann idealerweise direkt mit einem hinreichend großen Volumenstrom, der signifikant größer als der Volumenstrom der aktiven Zuluft durch die Crossjet-Düsen ist,

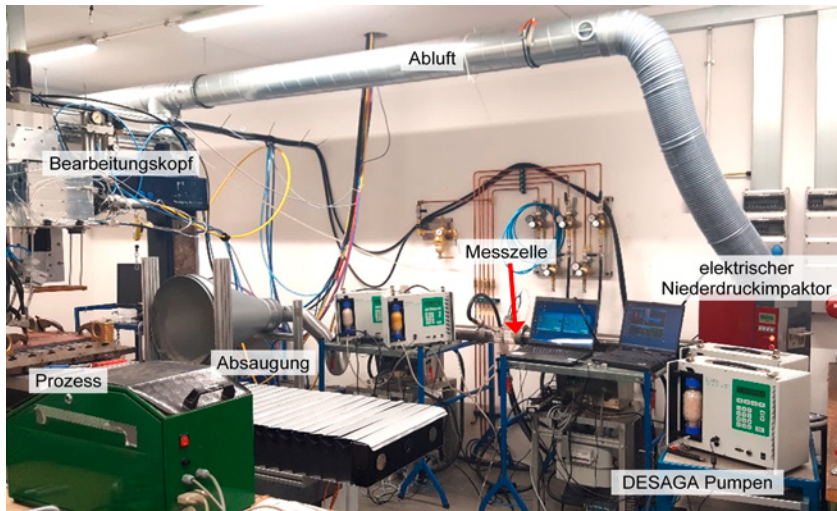


Abb. 12: Versuchsaufbau zur Emissionscharakterisierung am LZH während des Dickblechschweißens im I-Stoß

abgesaugt. So lässt sich ein gewisser Unterdruck innerhalb der Abschirmung aufrecht erhalten, welcher mittels der passiven Zuluft durch die entsprechenden Zuluftspalte und den Spalt zwischen der Abschirmung und den zu fügenden Blechen ausgeglichen wird. Die oberhalb der Prozesszone ausgebildete Strömung, die im Wesentlichen von den installierten Crossjets erzeugt wird, soll so weit wie möglich ohne Umwege und Hindernisse verlaufen, um die Erfassungs- und Absaugeffizienz zu steigern. Die Messungen haben gezeigt, dass unter den beschriebenen Bedingungen die geltenden Arbeitsplatzgrenzwerte für Gefahrstoffe gemäß TRGS 900 bzw. ggf. die Akzeptanzkonzentrationen für krebserzeugende Stoffe gemäß TRGS 910 problemlos einzuhalten sind, sofern gleichzeitig eine gewisse periphere Raumlüftung erfolgt.

Nach den durchgeführten Messungen (vgl. Tab. 1) sollte die Abluft aufgrund der vergleichsweise großen Emissionsraten insbesondere der Aerosole sowie von Mangan gereinigt werden, auch wenn das formal nicht zwingend erforderlich ist. Dafür ist ein abreinigbarer Oberflächenfilter mit hinreichend großer Filterfläche (mindestens 5 m^2 und maximal 40 m^2) zu empfehlen. Ergänzend sollte ein Aktivkohlefilter zur Adsorption organischer Gase installiert werden, sofern die zu fügenden Bleche mit einem organischen Primer versehen sind. Aufgrund des zu erwartenden Schweißspritzeraufkommens sind Maßnahmen gegen die Entstehung eines Filterbrandes vorzusehen.

Nach den durchgeführten Untersuchungen lässt sich das Schweißen dicker Bleche mittels Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlung aus Sicht von Arbeitssicherheit und Umweltschutz durch Realisierung der in der erstellten Sicherheitskonzeption vorgeschlagenen Maßnahmen sicher umsetzen. Die Untersuchungen zur Evaluierung von Lasersicherheit, Prozessmissionen und Gefahrstoffexpositionen sowie die darauf basierende Entwicklung der Sicherheitskonzeption werden in [20] detailliert dargestellt.

Tab. 1: Grenzwertvergleich für die wesentlichen Gefahrstoffkomponenten bei der optimierten Schweißprozessvariante mit Zusatzdraht (Laserstrahlleistung 56 kW im cw-Betrieb, Schweißgeschwindigkeit 1,0 m/min), ausgehend von den gemäß TA Luft geltenden Grenzmassenströmen und maximalen Massenkonzentrationen für die Ableitung der Abluft in die Umwelt

Beispiele TA Luft (Komponente)	Grenzmassenstrom [g/h]	Emissionsrate [g/h]	Grenzwert [mg/m ³]	Massenkonzentration [mg/m ³]
Aerosole	100	78 ± 3	20	111 ± 3,4
Mangan	5	3,98 ± 0,12	1	5,7 ± 0,17
TVOC – C _{ges} (Klasse I)	100	11 ± 1	20	16 ± 1,4
Benzol	1,5	0,005 ± 0,003	0,5	0,007 ± 0,001
Formaldehyd	12,5	0,021 ± 0,005	5	0,03 ± 0,006
Toluol	100	0,026 ± 0,005	20	0,037 ± 0,006
Ethylbenzol	500	< 0,004	50	< 0,006
m-/p-Xylol		0,009 ± 0,0003		0,013 ± 0,0004
o-Xylol		0,006 ± 0,0002		0,009 ± 0,0003
Styrol	100	< 0,004	20	< 0,006
Phenol		0,018 ± 0,003		0,026 ± 0,004
m-/p-/o-Kresol		< 0,004		< 0,006

5. ANLAGENKONZEPTIONIERUNG FÜR LASERSTRAHLSCHWEIßANWENDUNGEN UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG ERFORDERLICHER SICHERHEITSEINRICHTUNGEN

Die HELD SYSTEMS Deutschland GmbH (HELD) erarbeitete mit Unterstützung seiner Unterauftragnehmer Ingenieurbüro Goebel und Physikingenieurbüro Franek ein flexibles und modulares Anlagenkonzept für I- und T-Stoßschweißungen im Blechdickenbereich von 5 mm bis 30 mm. Dabei wurden die im Rahmen der Evaluierung von Lasersicherheit, Prozessemissionen und Gefahrstoffexpositionen (vgl. Kapitel 4) ermittelten Aspekte der Sicherheitskonzeption berücksichtigt.

Die Konzeptanlage kann Schweißnahtlängen bis zu 30 m ermöglichen. Der Antrieb der Achsen kann so angepasst werden, dass die geforderten Schweißgeschwindigkeiten erreicht werden.

Das Gesamtkonzept ist modular aufgebaut, wobei ein Modul aus einer Kombination von Schmelzbadsicherung und Andrückrollen auf der Unterseite der Bauteile besteht. Die Schmelzbadsicherung ist aus einzelnen Kupferelementen aufgebaut, wodurch im Gegensatz zu konventionellen Schmelzbadsicherungen (bspw. Keramikschiene) eine Mehrfachnutzung sichergestellt werden kann. Die Einzelelemente sind zu einer Kette zusammengefügt, welche relativ zum Bauteil und synchron zum Prozess bewegt werden kann. Um eine sichere Funktion zu gewährleisten, sind diverse Zustellmöglichkeiten sowie eine Kühlung der Andrückelemente gegeben.

Je eine lokale Einhausung der Schweißstelle für die verschiedenen Stoßarten (I-Stoß, T-Stoß) bilden weitere Module der Anlage. Diese Abschirmungen sind in jedem Punkt 500 mm von der Prozesszone entfernt. Somit ist ein Kompromiss zwischen Kompaktheit und eingeschränkter Erwärmung durch reflektierte Strahlung gefunden. Die Form der Einhausung

begünstigt die Luftströmung im Inneren der Kabine (vgl. Abb. 10). Die Strömung ist wichtig für eine sichere Abfuhr der entstehenden Schweißrauche, die den Prozess negativ beeinflussen können. Die integrierte Optik wird zusätzlich durch Crossjets geschützt.

Die Bearbeitungsoptik mit lokaler Einhausung wird an ein Schlittensystem montiert, das über Andrückelemente die Lage gegen das Gegenstück (untere Andrückrollen an der Schmelzbadsicherung) sichert. Eine Nachführung der Nut kann über Antriebe transversal zum Vorschub realisiert werden. Der Arbeitsabstand wird ebenfalls durch Sensorik überwacht und über eine vertikale Achse angepasst. Verfahrensmöglichkeiten in alle drei kartesischen Richtungen ermöglichen eine stabile Prozessführung.

Das Schlittensystem wird an einer Portalachse montiert und mittels Zahnstangen-Getriebe-Motorkombination verfahren. Hierbei kann die Getriebe-Motorauslegung nach Geschwindigkeitsvorgaben erfolgen. Die Laserstrahlquelle muss nicht mit verfahren werden, da Lichtleitkabellängen > 30m laut LL realisierbar sind. Dadurch kann der Aufbau der Anlage signifikant vereinfacht werden. Die Anlage ist mit zwei Schlittensystemen, eines je Stoßart, ausgerüstet, wodurch die Strahlquelle flexibel eingesetzt werden kann.

Die Diversität der Rahmenbedingungen von geforderten Geschwindigkeiten und Bauteilgeometrien stellen eine große Herausforderung dar. Jedoch konnte ein flexibles Konzept erarbeitet werden, das als Grundlage für eine Realumsetzung genutzt werden kann. HELD sieht kein Ausschlusskriterium, das eine Realisierung verhindern könnte. Die Details der Anlagenkonzeptionierung werden in [22] beschrieben.

6. EVALUIERUNG UND WEITERENTWICKLUNG DER SCHWEIßMETHODE IM WERTNAHEN UMFELD

Ziele der MW im Verbundvorhaben DIOMAR waren die Übertragung der grundlegend am LZH entwickelten Dickblech-Schweißprozesse auf schiffbaulich relevante Anwendungsfälle, die Diversifikation der Schweißmethode für weitere Fügeaufgaben (Dünnblech) sowie die Bewertung der entwickelten Verfahren und Umsetzungskonzepte (vgl. Abb. 13). Ein Großteil der Arbeiten fand dabei im Forschungslabor der Werft statt, welches zu Beginn des Projektes mit Unterstützung der Verbundpartner HELD und LZH für den Einsatz der hohen Diodenlaserstrahlleistungen ertüchtigt wurde. Anschließend erfolgte die Integration der von LL bereitgestellten Systemtechnik.

Ein Schweißprozess mit Laserstrahlung als einzige bzw. hauptsächliche Energiequelle stellte für die MW auch im Bereich der Entwicklung ein ganz neues Anwendungsfeld dar. Bezüglich schiffbaulicher Anforderungen und Vorgaben konnte dabei zwar auf viel Vorwissen zurückgegriffen werden, bzgl. des Schweißprozesses galt es aber, einige Grundlagen zu erarbeiten. Verstärkt wurde dies durch den primären Dickblechfokus, welcher ebenfalls von bisherigen Entwicklungsschwerpunkten der Werft abwich. Hieraus ergaben sich umfangreiche Anforderungen an die Prozessentwicklung, die zum Teil ein Umdenken bei der grundlegenden Vorgehensweise nötig machten.

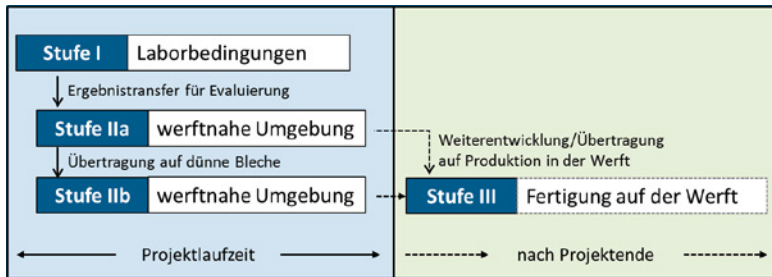


Abb. 13: Parallele Schweißprozessentwicklung im Labor und in der werftnahen Versuchsumgebung

Die Entwicklungsumfänge der MW erstreckten sich von Untersuchungen einer Laserstrahl-Stegschweißung als Ersatz für eine mechanische Badstütze, über die Entwicklung von Höchstleistungs-Diodenlaserstrahlschweißprozessen für die Dickblechanwendung am I- und T-Stoß (vgl. Abb. 14), bis hin zur Übertragung der Prozesse auf Dünoblechanwendungen. Vom Verbundpartner LZH entwickelte Schweißprozesse konnten hierzu gut in die werftnahe Versuchsumgebung überführt und dort anwendungsorientiert weiterentwickelt werden. Der Fokus der Schweißuntersuchungen lag auf der Entwicklung des Schweißprozesses in PA-Position für einen möglichst großen Blechdickenbereich.

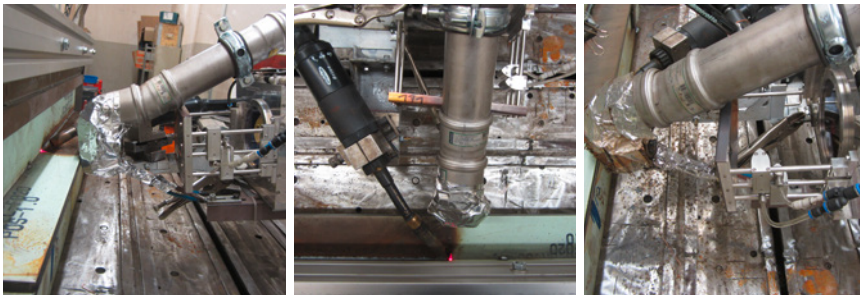


Abb. 14: Versuchsaufbau und Schweißprozessanordnung am T-Stoß

Parallel wurden auf Basis der Rahmenbedingungen des Schweißprozesses und sicherheitstechnischer Untersuchungen des LZH durch HELD Konzepte erarbeitet, die eine zukünftige Integration der neuen Schweißprozesse in eine schiffbauliche Fertigungsumgebung ermöglichen können. Schwerpunkte der Konzepte sind die Anlagenintegration der mechanischen Schmelzbadsicherung, die für eine Kontrolle der großen Schmelzbadvolumina notwendig ist und eine lokale Abschirmung der Laserstrahlprozesse, die den sicherheitstechnischen Aufwand einer zukünftigen Fertigungsanlage enorm reduzieren könnte.

Unter Berücksichtigung aller Entwicklungen wurde auf der MW zum Projektabschluss eine umfangreiche Nutzwertanalyse durchgeführt, die den aktuellen Entwicklungsstand der Schweißprozesse und der Anlagenkonzepte mit heute etablierten Fertigungsverfahren für verschiedene Blechdicken gegenüberstellt. Der Vergleich stellt für repräsentative Blechdicken im unteren (5 mm), mittleren (15 mm) und oberen (22 mm) Anwendungs-

bereich teils deutliche Vorteile der neuen Prozessvariante in Aussicht, wobei die Vorteile mit zunehmender Blechdicke aufgrund wechselnder Vergleichsverfahren deutlich zunehmen (vgl. Tab. 2).

Tab. 2: Ergebnis der Nutzwertanalyse

Blechdicke	Vergleichsverfahren	Nutzwert DIOMAR	Nutzwert Vergleich
5 mm	Laser-Lichtbogen-Hybrid	17,85	15,90
15 mm	Unterpulver-Schweißen, Lage-Gegenlage	18,10	15,55
22 mm	Unterpulver-Schweißen, mehrlagig	19,40	10,75

Das Potential der entwickelten Schweißprozesse wurde abschließend zudem im Rahmen standardisierter Prüfungen durch die Klassifikationsgesellschaft DNV verifiziert. Für den mittleren Blechdickenbereich wurden dabei sehr gute Ergebnisse erzielt, sodass eine Übertragbarkeit der Prozessergebnisse in eine schiffbauliche Fertigung sehr aussichtsreich ist. Für die geringste Blechdicke können weiterhin auftretende Abweichungen auf den aktuellen Versuchsaufbau zurückgeführt werden, weshalb die Prüfung mit Einschränkungen bestanden wurde. Für die höchste Blechdicke sind hingegen noch größere Entwicklungsaufwände absehbar, da relevante Prüflängen bisher nicht fehlerfrei hergestellt werden konnten.

Die verschiedenen im Rahmen des Teilvorhabens durchgeführten Untersuchungen werden in [23] ausführlich dargestellt.

7. AUSBLICK

Die MW konnte im Rahmen des Verbundvorhabens DIOMAR erhebliches Wissen in den Bereichen Höchstleistungslaserstrahlung und reines Laserstrahlschweißen erlangen. Die Kombination aus enormen Laserstrahlleistungen und Schweißprozessen, die ohne einen zusätzlichen Lichtbogen als Energiequelle auskommen, kann für zukünftige Anwendungen im Schiffbau ein großes Potential darstellen. Einen besonderen Reiz stellt hierbei das Anwendungsfeld der Dickblechschweißungen dar, da Innovationssprünge hin zu höchstproduktiven Anlagen hier in den letzten Jahrzehnten ausgeblieben sind.

Vor dem Hintergrund der Bedeutung der Schweißtechnologie für den schiffbaulichen Fertigungsprozess ist die ständige Weiterentwicklung von Kompetenzen in diesem Bereich ein zentrales Thema für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit unter den global konkurrierenden Werften. Das Schweißen ist weiterhin die bestimmende Fügetechnologie im Schiffbau. Die Entwicklung innovativer Schweißverfahren und deren Optimierung sind daher Aufgaben mit hoher Priorität, um einen permanenten Technologievorsprung zu sichern.

Durch die innovativen Höchstleistungs-Schweißprozesse sowie durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades sind deutlich höhere Prozessgeschwindigkeiten erreichbar.

Somit ist von einer Reduzierung der Durchlaufzeit in der schiffbaulichen Vorfertigung auszugehen. Durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades ist ebenfalls eine Steigerung der Qualität absehbar.

Die oben genannten prozess- und systemtechnischen Ansätze haben im Rahmen des Projektes noch keine Marktreife erlangt, weitere Entwicklungstätigkeiten sind aber bereits im Gange oder in Planung. Diese werden längerfristig zu erheblichen Entwicklungssprüngen und schließlich zum Durchbruch der Technologie führen.

Die im Projektverlauf erreichten Ergebnisse stellen für LL die Basis für weiterführende eigene Entwicklungsaktivitäten dar. Bei LL wird angestrebt, die Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben DIOMAR zügig in Laserprodukte zu überführen und so dem Trend zu leistungsfähigeren Strahlquellen zu folgen und zukünftig Laserstrahlquellen mit einer Ausgangsleistung von bis zu 60kW für Anwendungen im Bereich des Dickblechschweißens und Auftragschweißens (Beschichten) auf dem Markt anzubieten. In Verbindung mit solchen Strahlquellen sollen außerdem Strahlführungen und Optiken angeboten werden, die für diesen Leistungsbereich geeignet sind.

Anwendungen aus dem maritimen Umfeld stellen zudem besondere Anforderungen an die beteiligten Komponenten. Die Basis für zukünftige Laserprodukte im Werftumfeld konnte im Rahmen des Verbundvorhabens gelegt werden und LL plant nun die zu entwickelnden Produkte speziell auf die Anforderungen des maritimen Bereichs im Allgemeinen und innerhalb der Werft im Speziellen anzupassen.

Die Verwertung der im Projekt entwickelten Lasertechnologie ist besonders im Bereich des Dickblechschweißens von schiffbaulichen Strukturen in Verbindung mit hohen Schweißgeschwindigkeiten interessant und bietet einen Vorteil gegenüber konventionellen Verfahren. Auch im Bereich des Schweißens von Druckbehältern ergeben sich aussichtsreiche Möglichkeiten für die Verwertung der entwickelten Laserstrahlschweißprozesse. Darüber hinaus ist der Einsatz derartig hoher Laserstrahlleistungen besonders interessant für Beschichtungsanwendungen, bei denen großflächig pulverförmige Materialien mit besonderen Eigenschaften zur Veredelung/Reparatur von Oberflächen aufgebracht werden. Das Laserstrahlpulverbeschichten ist ein stark wachsendes Marktsegment, das auch für den maritimen Bereich relevant ist und im Bereich der Reparatur/Herstellung von Schiffsschrauben und anderen 3D-Bauteilen bereits heute eingesetzt wird.

Bei LL wird bereits heute eine große Anzahl von Laserstrahlquellen im Leistungsbereich zwischen 10 kW und 30 kW verkauft. Aufbauend auf den Projektergebnissen soll nun in den kommenden Jahren der Leistungsbereich von 30kW bis 60kW als neuer Markt hinzugewonnen werden.

Als Sondermaschinenbauer sieht HELD die zukünftige Kooperation mit Partnern im maritimen Umfeld positiv. Die umfangreichen Erkenntnisse, die aus dem Projekt gewonnen

werden konnten, können dabei in neue Konzepte und Produktionsanlagen einfließen und helfen die Anlagen effizienter werden zu lassen.

Teile der Projektergebnisse werden auch in anderen Marktsegmenten Verwendung finden und damit die Marktposition von HELD entsprechend stärken. Hierbei wären allem voran die Vorkehrungen für die Gewährleistung der Lasersicherheit im Umgang mit Höchstleistungs-Laserstrahlquellen zu nennen. Die für HELD neuartigen Ansätze der lokalen Einhausungen werden bei der Konzipierung von zukünftigen Großanlagen einfließen. Zusätzlich hervorzuheben ist die neuartige, vielfach einsetzbare Schmelzbad-sicherung für lange Schweißnähte. Diese Erkenntnisse können ebenfalls Impulse für Neuanlagen bringen.

Speziell für die Kooperation zwischen MW und HELD ist die Verwertung der Projektdaten für die Aufrüstung von Bestandsanlagen stark von Interesse. Durch die Flexibilität im Maschinenkonzept sieht HELD die Möglichkeit Teile aus dem DIOMAR-Verbundvorhaben an Bestandsanlagen nachzurüsten.

DANKSAGUNG

Das gesamte Konsortium des Verbundvorhabens, bestehend aus der MEYER WERFT GmbH & Co. KG, der Laserline GmbH, der HELD SYSTEMS Deutschland GmbH und dem Laser Zentrum Hannover e.V., dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Verbundvorhabens „Dickblechschweißen mittels Höchstleistungs-Diodenlaser für maritime Anwendungen (DIOMAR)“ (FKZ 03SX452) sowie dem Projektträger Jülich (PtJ) für die Projektträgerschaft.

LITERATUR

- [1] U. Dilthey: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 – Schweiß- und Schneidtechnologien. 3. bearbeitete Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Verlag (2006)
- [2] R. Poprawe: Lasertechnik für die Fertigung – Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag (2005)
- [3] DVS Merkblatt 3203 Teil 4: Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Nahtvorbereitung und konstruktive Hinweise. Düsseldorf, DVS-Verlag (01/2015)
- [4] G. Cerwenka, F. Beckmann, O. Steinmeier: Qualitätsgerechte 3D Laser-Schweißbearbeitung innovativer Schiffskonstruktionen (QuInLas) – Entwicklung lasergestützter Fügeverfahren für die automatisierte Sektionsfertigung im Schiffbau. Schlussbericht, FKZ 03SX271. Hamburg, Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik, Technische Universität Hamburg (2013)
- [5] R. Miebach, H. Lembeck: Die neue Fertigung der Meyer Werft – Laserhybridschweißen als Kerntechnologie. In: DVS-Berichte 225. Düsseldorf, DVS-Verlag, 187 – 191 (2003)
- [6] J. K. Kristensen: State of art in shipbuilding applications of hybrid laser-arc welding. 12th Nordic Laser Materials Processing Conference (NOLAMP 2009), 24. – 26.08.2009, Kopenhagen, Dänemark (2009)
- [7] D. Petring, S. E. Webster, Y. Tkach, P. Langenberg et al.: Hyblas: economical and safe laser hybrid welding of structural steel. Final Report, EUR 23867 (2009)
- [8] M. Böhm: Laser-Hybrid-Schweißen auf Erfolgskurs. SMM – Schweizer Maschinenmarkt 104, 53 – 54 (2003)
- [9] C. Thomy, M. Schilf, T. Seefeld, F. Vollertsen, G. Sepold, R. Hoffmann: CO₂-Laser-MSG-Hybridschweißen in der Rohrfertigung. In: DVS-Berichte 225. Düsseldorf, DVS-Verlag, 167 – 173 (2003)
- [10] G. Trommer: Hochleistungs-Schweißverfahren. Lichtbogen-MSG-Schweißen bietet vielfältige Möglichkeiten. Stahl 1, 42 – 45 (2004)
- [11] A. Sumpf, U. Jasnau, P. Seyffarth: 10 kW-Hochleistungsfaserlaser – Erfahrungen aus verschiedenen Anwendungen. In: DVS-Berichte 237. Düsseldorf, DVS-Verlag, 395 – 400 (2005)
- [12] R. Lahdo, O. Seffer, A. Springer, S. Kaierle et al.: GMA-laser hybrid welding of high-strength fine-grain structural steel with an inductive preheating. Physics Procedia 56, 8th International Conference on Photonic Technologies (LANE 2014), 08. – 11.09.2014, Fürth, 637 – 645 (2014)
- [13] O. Seffer, R. Lahdo, A. Springer, S. Kaierle: Laser-GMA hybrid welding of API 5L X70 with 23 mm plate thickness using 16 kW disk laser and two GMA welding power sources. Journal of Laser Applications 26 (4/2014), #042005 (2014)
- [14] C. Paul, G. Zimmermann, J. Pitzer: Qualitätsgerechte 3D Laser-Schweißbearbeitung innovativer Schiffskonstruktionen (QuInLas) – 3D-Laser-Fertigungsdemonstrator. Schlussbericht, FKZ 03SX271E. Haiger, Carl Cloos Schweißtechnik GmbH (2013)

- [15] M. Rethmeier, S. Gook, A. Gumenyuk: Einsatz des Laserstrahl-MSG-Hybridschweißverfahrens an längsnahtgeschweißten Großrohren der Güte API-X80/ -X100 zur Steigerung der Zähigkeit und Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. FOSTA-Berichte P822 (Hrsg. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.), Schlussbericht, AiF-FKZ 16425 N. Düsseldorf, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (2013)
- [16] G. Wiklund, O. Akselsen, A. J. Sörgjerd, A. F. H. Kaplan: Geometrical aspects of hot cracks in laser-arc hybrid welding. *Journal of Laser Applications* 26 (1/2014), #012003 (2014)
- [17] J. Malchus, V. Krause: Dickblechschweißen mittels Höchstleistungs-Diodenlaser für maritime Anwendungen (DIOMAR) – Höchstleistungs-Diodenlaser mit 60kW Ausgangsleistung für Schweißanwendungen im Schiffbau. Schlussbericht, FKZ 03SX452C. Mülheim-Kärlich, Laserline GmbH (2022)
- [18] DNV AS: Fatigue assessment of ship structures. Class Guideline DNV-CG-0129 (10/2021)
- [19] A. Hobbacher: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. 2nd Edition, IIW Dokument, International Institute of Welding, IIW-2259-15, Berlin, Springer (2016)
- [20] O. Seffer, S. Nothdurft, A. Hilck, J. Walter, M. Hustedt, J. Hermsdorf, S. Kaierle: Dickblechschweißen mittels Höchstleistungs-Diodenlaser für maritime Anwendungen (DIOMAR) – Laserstrahlschweißprozessentwicklung und Lasersicherheitskonzeption. Schlussbericht, FKZ 03SX452B. Hannover, Laser Zentrum Hannover e.V. (2022)
- [21] A. Hilck, M. Hustedt, O. Seffer, S. Nothdurft, J. Hermsdorf, S. Kaierle: Emission of scattered radiation from the process zone of welding processes using high-power diode lasers. *Procedia CIRP* 2022, 12th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2022), 04. – 08.09.2022, Fürth (2022)
- [22] J. Hußlein, J. Franek, K. Göbel: Dickblechschweißen mittels Höchstleistungs-Diodenlaser für maritime Anwendungen (DIOMAR) – Anlagenkonzeptionierung für Laserstrahlschweißanwendungen unter besonderer Berücksichtigung erforderlicher Sicherheitseinrichtungen. Schlussbericht, FKZ 03SX452D. Heusenstamm, HELD SYSTEMS Deutschland GmbH, Physikingenieurbüro Franek, Ingenieurbüro Goebel GmbH (2022)
- [23] M. Dröber, F. Boekhoff: Dickblechschweißen mittels Höchstleistungs-Diodenlaser für maritime Anwendungen (DIOMAR) – Evaluierung und Weiterentwicklung der Schweißmethode im werftnahen Umfeld. Schlussbericht, FKZ 03SX452A. Papenburg, MEYER WERFT GmbH & Co. KG (2022)

ENDURE –

ENERGIEEINSPARUNG DURCH DIE NUTZUNG DER RUDERKRAFT IM AUTOPILOTEN

AUTOREN

ARNE BROCKSTÄDT

BECKER MARINE SYSTEMS/BMS

JOCHEN HUNDEMER

IBMV MARITIME INNOVATIONSGESELLSCHAFT MBH

HENDRIK SCHWAB

RAYTHEON ANSCHÜTZ GMBH/RAN

EINLEITUNG

Das Manövrieren von Seeschiffen ist auch in der modernen Schifffahrt ein bleibendes relevantes Thema, da besonders die Größe und Trägheit der Schiffe eine sehr lange Reaktionszeit nach einer neu angelegten Ruderstellung mit sich bringt. Moderne, kommerzielle Autopilotensysteme nutzen eine Vielzahl von Eingangsdaten (u.a. Kurs, Ruderwinkel, Geschwindigkeit und Position), um ein Seeschiff automatisch zu steuern. In diesem Projekt wird untersucht in wie weit mit neuen datentechnischen Ansätzen das automatisierte Manövrieren verbessert werden kann. Beim Auswerten von Schiffsmanövern wird beispielsweise schnell klar, dass nach einem Kurswechsel Gegenruder gelegt werden muss, um die Drehbewegung des Schiffs abzufangen, wobei durch jedes zusätzliche Ruderlegen das Schiff weiter abgebremst wird. Auch während eines Kurshaltemanövers ist ständiges Ruderlegen erforderlich, um Umwelteinflüsse aus Wind und Wellen auszugleichen. Jedes Ruderlegen führt zu einem höheren Schiffswiderstand und damit auch zu einem erhöhten Leistungsbedarf des Schiffs. Bei stärkeren Kursänderungen kann es zu großen Ruderwinkeln kommen in dessen Folge es zu Strömungsablösung am Ruder kommen kann. Bei einer abgelösten Strömung steigt die Querkraft nicht weiter an. Gleichzeitig wächst jedoch der Widerstand, so dass der Leistungsbedarf für die Propulsion des Schiffes unnötig steigt.

Autopiloten erhalten derzeit kein Feedback über die erzielte Ruderwirkung in Form einer Kraft und berücksichtigen ebenso nicht, ob eine periodische Anregung durch den Seegang überhaupt ausgeglichen werden muss oder ob die Schiffsantwort nicht ebenso periodisch ist und somit lediglich um den Mittelwert schwankt.

Es ist daher das Ziel weitere Messgrößen in das Autopilotensystem einfließen zu lassen, um die Funktionalität zu verbessern. Eine Verbesserung kann im Sinne einer höheren Energieeffizienz, einem verringerten Materialverschleiß an beweglichen Teilen oder im Sinne einer erhöhten Sicherheit bewertet werden.

Das Projekt zielt auf die intelligente Verknüpfung des Autopiloten mit zusätzlichen, messtechnisch zugänglichen Größen ab, die bisher nicht in kommerziellen Autopiloten verfügbar sind. In der Vergangenheit wurde bei BMS das so genannte BIMS (Becker Intelligent

Monitoring System) entwickelt, mit dessen Hilfe jederzeit die am Ruder anliegende Ruderkraft gemessen werden kann und auf der Brücke zur Unterstützung der Schiffsführung visualisiert werden kann. Zu diesem Zweck ist der Ruderschaft mit Dehnungsmessstreifen ausgestattet, so dass über die gemessene Verformung auf die Ruderkraft rückgeschlossen werden kann. Hierdurch werden prinzipiell Ablösevorgänge am Ruder erfassbar und die Abweichung zwischen Ruderwinkel und hydrodynamischen Anstellwinkel bewertbar.

Das Ziel der Verknüpfung ist, den Steuervorgang durch den Autopiloten zu verbessern und in diesem Zuge Energieverluste und mechanische Beanspruchungen zu reduzieren, was in der Konsequenz zu Einsparungen im Kraftstoff und bei Reparaturkosten führen würde. Eine Verbesserung der Steuerfähigkeit trägt insbesondere zur Erhöhung der Sicherheit im Schiffsbetrieb bei.

2. PROJEKTVORSTELLUNG

2.1 VORSTELLUNG DES VERBUNDS

BMS – Becker Marine Systems GmbH

BMS ist ein mittelständisches Unternehmen und im Bereich von Schiffsrudern und Energy Saving Devices (ESDs) ein weltweit führender Lieferant für Werften und Reedereien. Die Produkte finden bei allen typischen seegängigen Schiffen Anwendung. Als führender Hersteller von Ruderanlagen und Energy Saving Devices ist es immer das Ziel den Schiffsbetrieb effizienter zu gestalten und dieses Ziel auch durch smartere Anlagen zu erreichen.

RAn - Raytheon Anschütz GmbH

RAn ist weltweit einer der führenden Hersteller von integrierten Brückensystemen und nautischen Geräten wie maritimen Navigationsradaren, Inertialsystemen und Kreiselpassagen, Autopiloten, Rudersteuerungs- und -überwachungsanlagen, elektronischen Seekarten sowie Funk- und Kommunikationssystemen. Als ein Unternehmen, das seit mehr als hundert Jahren Expertise auf dem Gebiet der Entwicklung von nautischen Navigations- und Steuerungssystemen besitzt, steht bei RAn ein großes Erfahrungspotential zur Verfügung.

2.2 ZIELSETZUNG

Ziel des vorgestellten Innovationsvorhabens ist es, ein Hybridsystem mit neuartigen Funktionen zu realisieren, das aus einem System zur Ruderkraftmessung (Teilsystem 1 - BMS) und einem Autopiloten (Teilsystem 2 - RAn) besteht. Dieses Hybridsystem mit den beiden Baugruppen ermöglicht eine intelligente datentechnische Integration der Ruderkraft im Autopiloten und stellt damit einen Innovationssprung im Hinblick auf die Erhöhung der Sicherheit und der Effizienz im Schiffsbetrieb dar.

Zusammenfassend dargestellt, besteht die Herausforderung des ENDURE Projekts darin, die Möglichkeiten zur Nutzung von Ruderkraftdaten und anderer Sensorinformationen im

Autopiloten zu untersuchen und eine Integrationslösung zu entwerfen und zu erproben. Dabei sollen die Potenziale bewertet und quantifiziert werden.

Ein weiteres Ziel ist, den Nachweis zu erbringen, dass die Regler weiterhin die erforderlichen Stabilitätskriterien entsprechend der einschlägigen Normen erfüllen und somit prinzipiell zulassungsfähig sind.

2.3 KONZEPTVORSTELLUNG UND ARBEITSPAKETE

Um die Bewertung des Potenzials der Integration von zusätzlichen Sensordaten in den Autopiloten vorzunehmen, wurde folgendes Konzept verfolgt:

In einem ersten Schritt wurden Referenzfälle sowie regelungstechnische Modelle festgelegt, anhand derer die Untersuchungen durchgeführt wurden. Des Weiteren wurden Kriterien definiert, mit denen die Bewertung diverser Szenarien vorgenommen wurde. Beispielsweise wurde zum einen die Propulsionsarbeit bewertet, die erforderlich war, um ein bestimmtes Manöver mit verschiedenen Reglungsansätzen durchzuführen. Zum anderen wurde in einem weiteren Ansatz ein tribologisches Modell zum Lagerverschleiß erarbeitet, das die Vorhersage der Abnutzung in den Lagern erlaubt.

Beide Ansätze wurden in einem vereinfachten und rechentechnisch schnellen Verfahren zur Berechnung von Schiffsmanövern auf Basis von Manövrierkoeffizienten eingebettet. Das hier verwendete Verfahren der Manoeuvring Modelling Group (MMG) ist ein weit verbreiteter Ansatz, in dem die am Manövrieren beteiligten Komponenten, bzw. die durch sie verursachten Kräfte und Momente durch prägnante Formelzusammenhänge beschrieben werden. Im nächsten Schritt wurden die Bewegungsgleichungen gelöst und das Bewegungsverhalten des Schiffs untersucht. Für das MMG-Verfahren existierten eine Reihe öffentlich verfügbarer Datensätze. Für die Untersuchungen im Rahmen des ENDURE Projekts wurden die Koeffizienten des S175 verwendet, einem generischen Schiff, das an ein Containerschiff angelehnt ist. Da die Standardkoeffizienten das Verhalten des Ruders nicht hinreichend genau beschreiben, wurde für die Ermittlung der Ruderkräfte ein eigenes Modell entwickelt.

Zur Überprüfung der Wirksamkeit sind zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet worden. Zur Bewertung der Qualität des Steuervorgangs ist ein Kurswechsel von 80° bei einer Anlaufgeschwindigkeit von 20 kn analysiert worden. Wesentliche Kennzahlen hierbei sind beispielsweise die Dauer des Kurswechsels sowie die maximale Ruderlage und eventuell auftretende Strömungsabrisse am Ruder. Zur Bewertung der Energieeffizienz ist das Systemverhalten bei Kurshaltung unter Seegangseinfluss untersucht worden. Hierbei sind Simulationen mit unterschiedlichen Kombinationen aus Schiffsgeschwindigkeit, Seegangsstärke und Seegangsrichtung durchgeführt worden. Zur Bewertung des Einflusses der Ruderkraft auf die Regelungsgüte sind zudem Identifikationsversuche für das regelungstechnische Schiffsmodell erfolgt. Für alle Simulationen wurde der Leistungsbedarf an der Propellerwelle und der Abrieb am Ruderlager bewertet.

Eine weitere datentechnische Verknüpfung des Autopiloten mit zusätzlicher Sensorik erfolgte in Form eines adaptiven Seegangsfilters. Hierzu wurde über einen geeigneten Sensor, beispielsweise eines Strapdown-Kompaß, die Rollbewegung des Schiffes erfasst und daraus die Wellenbegegnungsfrequenz des Schiffes ermittelt. Dies hatte zum Ziel über einen Kerbfilter diese Bewegungen in diesem Frequenzbereich im Autopilot auszublenden und so eine Schiffsbewegung in diesem Frequenzbereich zuzulassen und nicht durch den Autopiloten auszuregeln. Dahinter stand die Annahme, dass die periodische Schiffanregung im Mittel nicht zu einer Kursabweichung führt. Das Ruderlegen sollte infolge dessen eingespart werden, was dazu führt, dass der Geschwindigkeitsabfall durch den erhöhten Ruderwiderstand geringer ausfällt und die Propulsionsleistung optimiert wird und zudem den Verschleiß im Lager reduziert.

Ergebnisse der Kurswechsel-Simulation

Das Kurswechselmanöver wurde mit einer Ruderwinkeländerung von 35° eingeleitet und sollte nach einer Kursänderung von 80° durch den Autopiloten beendet werden. Das Manöver wurde sowohl mit dem Standard-Autopiloten als auch mit dem Autopiloten mit Ruderkraftmessung durchgeführt. Um Ablösung am Ruder zu vermeiden, wurden durch den im erweiterten Autopilot implementierten Beobachter mit der Ruderkraft als Messgröße die effektiven Anströmwinkel des Ruders auf 20° limitiert. Hierdurch fällt der Ruderwiderstand geringer aus und das Schiff wird weniger stark abgebremst. In der untersuchten Simulationszeit von 10 min wurde bei einer Startgeschwindigkeit von 15 kn so eine ca. 40m weitere Strecke zurückgelegt, was einer viertel Schiffslänge entspricht oder einer Geschwindigkeitszunahme von etwa 0.15kn. Eine Übersicht über das Manöver ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Vermeidung von Ablösung wäre jedoch auch ohne die Berücksichtigung der Ruderkraft möglich, indem der absolute Ruderwinkel auf 20° limitiert wird. Es konnte gezeigt werden, dass der Geschwindigkeitsabfall bei einer Limitierung des Ruderwinkels wiederum geringer ausfällt, jedoch dafür die Dauer bis zu der das Schiff den Kurswechsel vollzogen hat, steigt, da die Drehrate des Schiffs abnimmt. Bei einer Limitierung des absoluten Ruderwinkels, was leicht in einem Autopiloten zu berücksichtigen wäre, können die effektiven Anstellwinkel nicht in der Art ausgereizt werden, wie dies bei einem Beobachter der Ruderkraft möglich wäre.

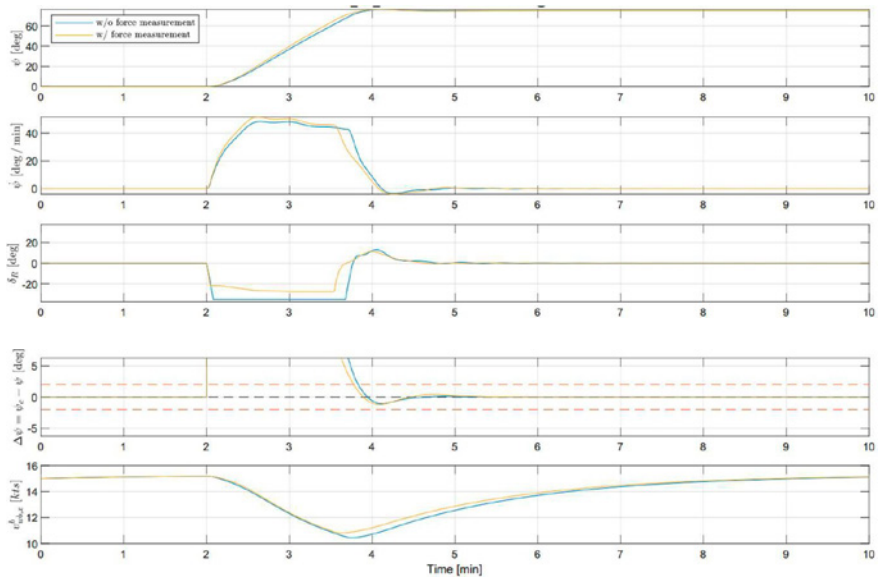


Abb. 1: Kurswechsel mit und ohne Berücksichtigung der Ruderkraft im Autopilot.

Analyse der Kurshaltungsversuche

Um das Potenzial beim Kurshalten zu bewerten, wurde ein modifiziertes Z-Manöver mit veränderlichem Ruderwinkel und Kriterium für den Zeitpunkt des Ruderslegens untersucht. Verglichen wurde das auf Basis der Ruderquerkraft bestimmte Drehmoment (N_{δ}) mit dem Moment (\tilde{N}_{δ}), das der Standard-Autopilot auf Basis des anliegenden Ruderwinkels abschätzt. In dem Fall, dass beide Momente identisch wären, würde die im Autopiloten hinterlegte Differentialgleichung die Realität exakt abbilden und die Ruderquerkraft würde keine neue Information einbringen. Die angesetzten Vereinfachungen zeigen jedoch Unterschiede, so dass zu bewerten war, in wie fern diese relevant für den Regelungsvorgang sind. In Abbildung 2 sind beide Drehmomente gegenübergestellt. Die Korrelation beider Werte wurde durch das mit r_2 gekennzeichnete Bestimmtheitsmaß von 0.96 als sehr hoch eingeschätzt. Bei kleinen Ruderwinkeln (in den ersten 9000 Datenpunkten) sind kaum Unterschiede zu erkennen, erst bei großen Ruderausschlägen werden Differenzen ersichtlich. Das Kurshalten findet jedoch in der Regel bei Ruderausschlägen unterhalb 10° Ruderwinkel statt, bei denen die Korrelation zwischen vereinfachter Abschätzung des Drehmoments auf Basis des geometrischen Ruderwinkels und der detaillierteren Bewertung durch die erzeugte Ruderquerkraft sehr hoch ist. Daher wurde der Einfluss der Ruderkraftmessung auf das Kurshaltemanöver als gering eingeschätzt.

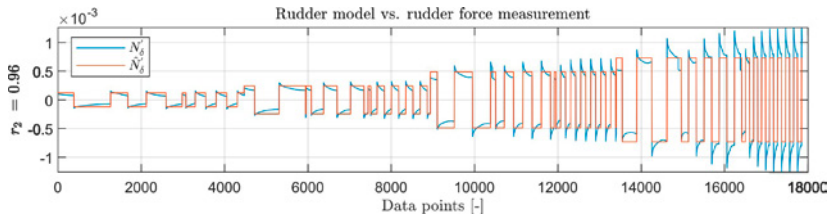


Abb. 2: Vergleich zwischen simulierten Drehmoment und im Standard-Autopiloten abgeschätzten Ruderdrehmoment.

Um den Einfluss auf die Propulsionsleistung weiter zu quantifizieren, wurde das Schiff einer Reihe von Seegangsszenarien ausgesetzt und für jedes Szenario die mittlere Leistung mit unterschiedlichen Autopilotvarianten bestimmt. Insgesamt wurden 27 Szenarien verwendet, die sich aus der Kombination von je 3 Schiffsgeschwindigkeiten, Seegangsstärken und Wellenbegegnungsrichtungen ergaben. Verglichen wurde zum einen der Standard-Autopilot und der erweiterte Autopilot, der die Ruderkraftmessung verwendet. Zum anderen wurden die Ergebnisse mit Standard-Autopilot und dem seegangsadaptiven Autopilot gegenübergestellt. Es stellte sich heraus, dass die Berücksichtigung der Ruderkraft zu einer Leistungsreduktion von ca. 0.1 % führt und die Abrasionstiefe an den Ruderlagern um 0.4mm pro Jahr zurückgeht. Die Berücksichtigung des adaptiven Seegangfilters hatte eine Reduktion der Leistung um 0.9 % zur Folge und eine Reduktion des Abriebs um 1mm pro Jahr. Dies ließ darauf schließen, dass die Ruderbewegungen durchaus reduziert werden, jedoch der Zusatzwiderstand in Folge des Ruderlegens bei kleinen Ruderlagen nicht so ausgeprägt ist. In Abbildung 3 ist das Verhalten des Schiffs mit und ohne adaptiver Seegangsfilerung dargestellt. Während der ersten 5 Minuten ist der adaptive Seegangsfiler nicht aktiv, so dass die vom Seegang erzeugten Abweichungen vom Zielkurs fortlaufend durch Ruderbewegungen ausgeglichen werden. Im zweiten Abschnitt werden durch die Filterungen Abweichungen im Bereich der Begegnungsfrequenz gedämpft an den Autopilot weitergegeben, so dass nicht mehr durch Ruderlegen auf diese Abweichungen reagiert wird. Entsprechend fallen die Ruderausschläge deutlich geringer aus.

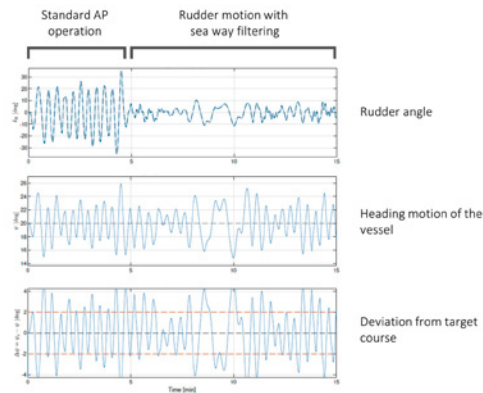


Abb. 3: Verhalten des Schiffs mit und ohne adaptiver Seegangsfilerung.

Verbesserung der BIMS Messtechnik

Für die Integration der Ruderkraft in den Autopiloten ist ein hohes Signal zu Rauschverhältnis vorteilhaft. Die bisherigen Messungen mit BIMS deuteten jedoch darauf hin, dass eine Verbesserung des Signals erforderlich ist. Für die Aufbereitung des Signals wurden die typischen Störgrößen an Bord eines Schiffs kategorisiert und quantifiziert. Neben den im Schiff erzeugten Störgrößen haben auch die externen Störungen, wie beispielsweise die durch den Propeller erzeugten Schwankungen und die Wellenanregung, Relevanz. Über eine weitere Sensorik wurden Störgrößen wie etwa Schwingungen, die von den diversen Anlagen und Aggregaten in der Umgebung des Rudermaschinenraums erzeugt werden, erfasst und für die Filterung des Ruderkraftsignals genutzt.

Aufgrund der höheren Flexibilität bei der Auswahl möglicher Filter und der Notwendigkeit Verzögerungen in der Signalverarbeitung möglichst gering zu halten, wurde eine digitale Signalverarbeitung gewählt. Die Implementierung und Erprobung der Verfahren erfolgte mittels MATLAB/SIMULINK mit dem Ziel die entwickelte Methode anschließend auf eine kompatible Hardware zu übertragen. Als Hardware wurde unter diversen Möglichkeiten die ARDBOX ausgewählt, da sie über die nötigen digitalen und analogen Ein- und Ausgangskanäle verfügt, eine einfache Integration in andere Systeme ermöglicht, eine Schnittstelle zu der gewählten Entwicklungsumgebung bietet und für eine weitere Nutzung keine spezielle, kostenpflichtige Software erforderlich ist. Neben dem zu filternden Spannungssignal, das die Ruderkraft repräsentiert und vom BIMS ausgegeben wird, wird ein Beschleunigungssensor angeschlossen. Der selbstkalibrierende Sensor, soll im Betrieb Beschleunigungen, die durch die Störquellen hervorgerufen werden, messen. Das Signal durchläuft zunächst einen Tiefpassfilter, bevor das aktuelle Spektrum laufend nach einer Fouriertransformation auf dominierende Frequenzen hin untersucht wird.

Das eigentliche Ruderkraftsignal durchläuft eine Kombination aus digitalen Filtern sowie einem Tiefpassfilter. Der Tiefpassfilter wird entsprechend der dominierenden Frequenzen parametrisiert, so dass Frequenzen oberhalb der im Störsignal dominierenden Frequenz stark gedämpft werden. Ein Beispiel für das so gefilterte und das ungefilterte Signal ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Das Signal zu Rauschverhältnis wurde so um 2.7 dB verbessert. Als Verzögerung zwischen beiden Signalen wurde eine Zeit von 6 Samples ermittelt.

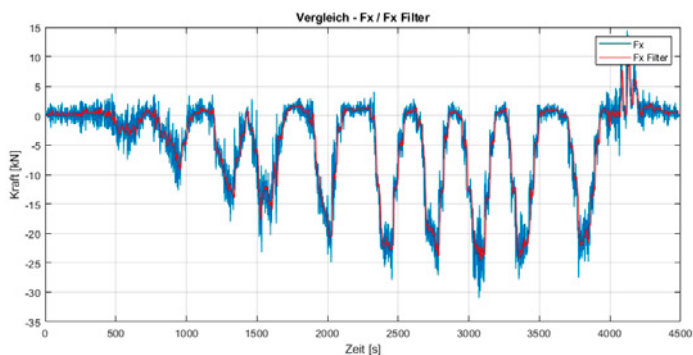


Abb. 4: Vergleich des aufbereiteten Ruderkraftsignals und der Rohdaten.

Die Erprobung der Signalverarbeitung erfolgte auf einem Prüfstand, bei dem der Beschleunigungssensor auf einem elektrodynamischen Shaker montiert war und über ein definiertes Signal die Störgröße simuliert wurde. Parallel wurde ein zuvor an Bord aufgenommenes BIMS Signal entsprechend verarbeitet. Eine Erprobung an Bord war aufgrund der Pandemiesituation nicht möglich, da die Reedereien den Besuch an Bord auf das für den Betrieb erforderliche Minimum beschränkten.

Die Verifizierung der am vereinfachten Simulationsmodell prognostizierten Veränderungen sollte mittels Modellversuchen und durch Erprobung in Seeversuchen erfolgen. In der Vorbereitung der Modellversuche gelangte man in Zusammenarbeit mit der HSVA zu der Einschätzung, dass die Aussagekraft der Versuche auf Grund von Maßstabeffekten und Messtoleranzen nicht ausreichend sein wird. Gleichzeitig wurde der Aufwand zur Einrichtung des Modells ähnlich hoch wie bei einer Seeerprobung eingeschätzt. Aus diesen Gründen wurde auf die avisierten Modellversuche verzichtet.

Verifizierung der Ergebnisse

Im weiteren Projektverlauf wurde ein mehrstufiges Konzept zur Seeerprobung der Verknüpfung von Ruderkraftmessung und Autopilot entwickelt. Es war vorgesehen, die Messungen an Bord eines Containerschiffs durchzuführen, das bereits mit BIMS ausgestattet ist. Hierzu war schon vor Projektbeginn ein Letter of Intent mit der Reederei vereinbart worden. In einem ersten Schritt sollten Messdaten wie Ruderkraft, Schiffsgeschwindigkeit und Kurs, während vorgegebener Manöver erhoben werden. Die gewonnenen Daten sollten mit dem Simulationsmodell abgeglichen werden und eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf das reale Schiff geprüft werden. In einer zweiten Kampagne sollte die testweise Integration der Ruderkraft in den Autopiloten und des adaptiven Seegangfilters erfolgen. Im letzten Schritt war eine Zulassung für den Testbetrieb des experimentellen Autopiloten und die Durchführung von Seeversuchen geplant. Durch die anhaltende Pandemie verzögerte sich die Umsetzung des Konzepts. Die unklaren Randbedingungen führten dazu, dass keine Aussagen möglich waren, wann ein Betreten der Schiffe durch externes Personal möglich sein würde, so dass eine Planung des weiteren Vorgehens im fortgeschrittenen Projektstadium unmöglich gemacht wurde. Um das Projekt zu einem aussagekräftigen Ergebnis zu führen, wurde daher im Konsortium beschlossen das vereinfachte MMG-Simulationsmodell um eine deutlich detailliertere CFD Simulationen zu ergänzen und die gewonnenen Erkenntnisse in diesen Simulationen zu überprüfen. CFD (Computational Fluid Dynamics) ist ein rechenaufwändiges, numerisches Verfahren in dem die Strömung um das Schiff detailliert aufgelöst und das zeitliche Verhalten des Schiffs ermittelt werden kann. Dies erlaubte die Untersuchung einer realen Schiffsgometrie im Gegensatz zu dem bisher verwendeten auf Koeffizienten basierten MMG Modell des generischen S175 Schiffs. Der Kurs des Schiffs sowie die Ruderkräfte werden wie in der Großausführung an eine angekoppelte Autopiloten-Software rückgeführt, die die Bewegung des Ruders vorgibt und damit die Bewegung des Schiffs beeinflusst. Die Simulationen werden aktuell im Maßstab der Großausführung durchgeführt. Dabei werden die Interaktion des Schiffs mit der freien Wasseroberfläche, das

Ruder sowie der an der Propulsion beteiligte Propeller und die Bewegung des Schiffes in allen Freiheitsgraden berücksichtigt.

Die externen Umwelteinflüsse sind in der Seerprobung kaum in dem erforderlichen Maße erfassbar, während sie im Gegensatz dazu in der Simulation modelliert werden können. Da die Umwelteinflüsse jedoch die Ergebnisse der Seerprobung in der Größenordnung der erwarteten Verbesserungen beeinflussen, ist fraglich, ob durch eine Seerprobung überhaupt ein Nachweis sicher hätte erbracht werden können. Daher erscheint die realitätsnahe Modellierung per CFD der geeignete Ansatz für die Verifizierung der erzielten Prognosen.

3. ZUSAMMENFASSUNG

In dem ENDURE Projekt wurde die datentechnische Verknüpfung der kontinuierlich gemessenen Ruderkraft und des Autopiloten an Bord eines Schiffs zur Verbesserung des Steuerverhaltens untersucht. Im Vordergrund standen dabei eine Verbesserung der Propulsionsleistung während des Manövrierens, eine Reduktion des Verschleißes am Ruderlager und ein zielgenaueres Steuern des Schiffes und die damit verbundene Erhöhung der Schiffssicherheit.

Zunächst wurden Kriterien und Manöver zur Bewertung der Verbesserung festgelegt. Im zweiten Schritt wurde ein Autopilot entwickelt, der anstatt des aktuellen anliegenden Ruderwinkels die Ruderkraft über einen Beobachter aufnimmt und auf dieser Grundlage die Schiffsbewegung steuert. Als weitere datentechnische Verknüpfung wurde ein adaptiver Seegangfilter entwickelt und im Autopiloten integriert, der es ermöglicht Ruderbewegungen des Schiffes im Seegang zu minimieren und hierdurch die Propulsionsleistung zu reduzieren. Die Modellierung der Ansätze zeigte Leistungseinsparungen im Bereich von 1 %. Die Reduktion der Ruderbewegung führte zu einem reduzierten Verschleiß von bis zu 1 mm pro Jahr, was signifikant ist.

Es konnte gezeigt werden, dass der neu entstandene Autopilot den einschlägigen Stabilitätsanforderungen genügt und damit grundsätzlich für einen Einsatz an Bord geeignet ist.

Pandemiebedingt ließ sich eine Verifizierung der Methode nicht in Form von Seerprobungen durchführen, da aufgrund der herrschenden Kontaktbeschränkungen Arbeiten an Bord der Schiffe nur für das für den Schiffsbetrieb zwingend erforderliche Personal möglich war.

EXTENSE –

ENTWICKLUNG EINES MESSSYSTEMS (MULTISENSORPLATTFORM)
ZUR DETEKTION UND ORTUNG VON OBJEKTEN IN SEDIMENTEN

AUTOREN

DIPL.-ING. GERD SEIDEL	SEA & SUN TECHNOLOGY GMBH, TRAPPENKAMP
DR. SUSAN MAU	SEA & SUN TECHNOLOGY GMBH, TRAPPENKAMP
PROF. DR.-ING. HORST HELLBRÜCK	TECHNISCHE HOCHSCHULE LÜBECK
SVEN OLE SCHMIDT M.SC.	TECHNISCHE HOCHSCHULE LÜBECK
DIPL.-ING. FABIAN JOHN	TECHNISCHE HOCHSCHULE LÜBECK
DR. CLAUS BACHMANN	J&C BACHMANN GMBH, PFORZHEIM
ELENA NUNNENMANN M.SC.	J&C BACHMANN GMBH, PFORZHEIM

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Die Detektion von Objekten und Materialien im Meeresboden gewinnt im Hinblick auf Aktivitäten der Offshore-Industrie zunehmend an Bedeutung. Der Ausbau von auf dem Meer installierten Windkraftanlagen und Ölplattformen aber auch Telekommunikationssysteme für die globale Vernetzung wird weltweit vorangetrieben. Dazu muss einerseits vor dem Bau oder Verlegung das vorgesehene Areal auf Inhomogenitäten an der Oberfläche und im Sediment untersucht werden, um z. B. anthropogene Störkörper wie verklappter Schrott aus Schifffahrt und Fischerei oder Rüstungsalftlasten zu identifizieren, die bei der Installation hinderlich werden. Andererseits haben viele Offshore-Strukturen durch ihre Energieübertragungs- oder Kommunikationskabel eine direkte Anbindung an das Festland, deren Lage und Beschaffenheit regelmäßig zu überprüfen sind.

In den letzten Jahrzehnten ist der Anteil an Energieübertragungskabeln stark gewachsen. Seekabel in Nord- und Ostsee bilden ein gesamteuropäisches Stromnetz ergänzend zu den Landverbindungen. Hinzu kommen die vielen Energieübertragungskabel, die die im Meer errichteten Offshore-Windkraftanlagen mit dem Festlandnetz verbinden.

Da Seekabel durch anderweitige Nutzung der Meere sowie durch Umwelteinwirkungen gestört oder zerstört werden können, sind Schutzmaßnahmen erforderlich. Die am häufigsten angewandte Schutzmaßnahme ist die Verlegung von Kabeln in den Meeresboden. Dabei werden häufig Verlegetiefen von 1 bis 3 Metern vorgesehen. Diese Schutzmaßnahme wird bei internationalen Telekommunikationskabel sogar bis in Wassertiefen von 1500 Metern (Kontinentalrand) realisiert.

Um die Effektivität der Schutzmaßnahmen zu prüfen und die Integrität der submarinen Installationen zu gewährleisten, sind turnusmäßige Prüfungen der Kabeltrassen erforderlich, insbesondere die Prüfung der Verlegetiefe bzw. die Mächtigkeit der Sediment-Überdeckung über einem Kabel.

Systeme zur Detektion und Ortung von anthropogenen Fremdkörpern im Meeresbodensediment sind zwar verfügbar, die Erfahrung in der Praxis zeigt jedoch, dass heutige Systeme zu unsichere Ergebnisse in Bezug auf die Ortung von Energieübertragungskabel im laufenden Betrieb erreichen. Zudem ist die Detektion von Fremdkörpern vor dem Bau sehr unspezifisch und es muss aufwendig nachuntersucht werden, um eine endgültige Entscheidung für ggf. die Notwendigkeit einer Räumung treffen zu können.

Das Konsortium bestehend aus: Sea & Sun Technology GmbH, J&C Bachmann GmbH, der Technischen Hochschule Lübeck und dem assoziierten Partner Fugro Germany Marine GmbH beabsichtigen gemeinsam eine Multisensorplattform, kurz Messsystem, zur Detektion und Identifikation von anthropogenen Objekten und Strukturen in Sedimenten zu entwickeln. Mittels des Messsystems lässt sich submariner Raum und dessen Infrastruktur erkunden. Insbesondere soll das Messsystem Unterwasserkabel, Pipelines und zur Detektion eines breiten Spektrums von Objekten und Materialien geeignet sein. Ziel ist, das Messsystem für den In-situ-Einsatz zu konfigurieren. Das Messsystem liefert durch die Fusion der Daten verschiedener Sensoren deutlich robustere Ergebnisse als Systeme mit nur einer einzigen analytischen Sensortechnologie. Noch besitzen aktuell eingesetzte Systeme signifikante Ortungs- und Detektionsunsicherheiten, mit dem Messsystem sollen zuverlässigere und umfangreichere Informationen erhalten werden.

2. MULTISENSOR-PLATTFORM

Im Projekt wurde eine Multisensor-Plattform zur zuverlässigen und flexiblen Objekterkennung und -lokalisierung entwickelt. Dabei werden verschiedene Daten von Sensoren kombiniert (fusioniert), um bessere Messergebnisse zu erzielen als mit den einzelnen Sensorsystemen. Die verschiedenen Sensorsysteme haben dabei unterschiedliche Schnittstellen, Datenformate und Datenraten. Daher setzen wir auf einen ereignisgesteuerten Ansatz, um Steuer- und Messdaten einheitlich im Gesamtsystem zu verarbeiten.

Die erarbeitete Kommunikationslösung auf Basis des Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)-Protokolls erhöht dabei die Skalierbarkeit, Flexibilität und Modularität des verteilten Messsystems. Alle Clients senden Datennachrichten mit einem Topic (String zur Identifikation) an einen Broker. Der Broker leitet die empfangenen Nachrichten dann an diejenigen Clients weiter, die das entsprechende Topic abonniert haben. Clients in dem Messsystem sind alle Sensoren, Aktoren, Algorithmen und Softwaremodule.

Die Komponenten sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Sensoren und Aktoren sind über die zentrale Dateneinheit, den Broker verbunden und kommunizieren über das MQTT-Protokoll. Adapter schließen bei Bedarf Sensoren als Komponente an die Multisensor-Plattform an.

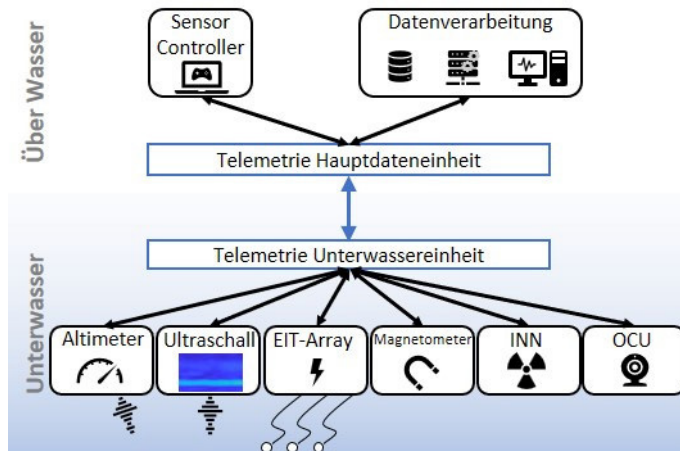


Abb. 1: Aufbau einer Multi-Sensor-Plattform mit einheitlichem Daten- und Kontrollfluss. Die Sensorplattform integriert Altimeter, Ultraschallsensoren, ein EIT-Array – Elektrische Impedanz Tomographie Array, Magnetometer, ein INN - Impuls Neutronen Sensor und eine OCU – Optische Kontrolleinheit. © IEEE

Die echtzeitfähige Multisensor-Plattform wird vom Schiff aus betrieben. Die Sensoren befinden sich unter Wasser und werden über eine Unterwasser-Telemetrieinheit mit Strom versorgt und sind mittels Ethernet als Kommunikationseinheit mit dem Schiff verbunden. Abbildung 2 zeigt den Prototypen der Multisensorplattform im Aufbau mit Magnetfeld-Sensoren (A), Ultraschallsensoren (B), Altimetern (C) und dem EIT-Array (D&E).

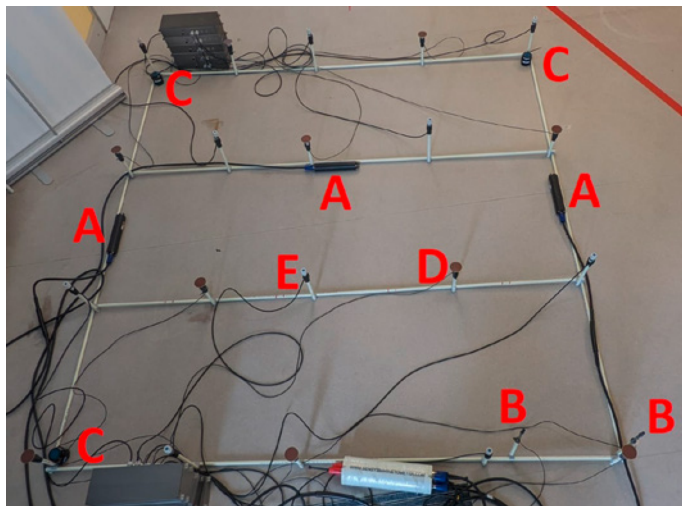


Abb. 2: Prototyp der Multisensor-Plattform für die Erkennung und Lokalisierung von Unterwasserobjekten. A: Magnetfeldsensoren, B: Ultraschallwandler, C: Altimeter, D: EIT-Quellenelektrode, E: EIT-Messelektrode (ohne INN und OCU). © IEEE

Die eingesetzten Sensoren und Sensortechnologien beeinflussen sich gegenseitig und die jeweiligen Messergebnisse. Ein Zeitmultiplex-Ansatz (*Time Division Multiplexing - TDM*)

mit zentraler Zuweisung von Zeitintervallen für die jeweiligen Sensoren minimiert eine gegenseitige Beeinflussung. Diese ereignisgesteuerte Architektur (*Event-Driven-Architecture - EDA*) fusioniert die Sensordaten.

2.1. ELEKTRO-IMPEDANZ TOMOGRAPHIE

Die Elektro-Impedanz-Tomographie (*EIT*) ist ein bildgebendes Verfahren, das seine Ursprünge in der Medizintechnik hat. Zur Anregung und Messung wird ein Elektroden-Array verwendet. Während zwei beliebige Elektroden einen Stromfluss im Wasser anregen, wird das elektrische Feld als Potentialverteilung mit weiteren Elektroden gemessen. Ändert sich die Leitfähigkeitsverteilung der Umgebung, in dem sich beispielsweise ein metallener Körper im betrachteten Bereich befindet, ändert sich das elektrische Potential an den Messelektroden. Aus der Verteilung des Potentials lässt sich die Form und Position eines Objekts bestimmen.

Das Elektroden-Array besteht aus je zehn Quellelektroden (Stromerzeugung) - und Messelektroden (Potentialmessung). Die Quellelektroden haben eine größere Elektrodenfläche und damit geringere Übergangswiderstände. Die Messelektroden haben eine kleinere Fläche. Je eine Quellelektrode und Messelektrode sind in einer Sensorbox integriert. Abbildung 3 zeigt das Blockdiagramm einer EIT-Sensorbox mit einem RedPitaya-Board zur Signalansteuerung und -messung, einer geregelten Stromquelle und einer analogen Signalverarbeitungsplatine für die differentielle und verstärkte Messung der elektrischen Feldverteilung und des Stroms. Die 20 EIT-Elektroden sind aktuell in einem zwei-dimensionalen Array mit einer Größe von 2 m × 2 m und einem Abstand zwischen den Elektroden von 0,8 m angeordnet, wie in Abbildung 2 dargestellt.

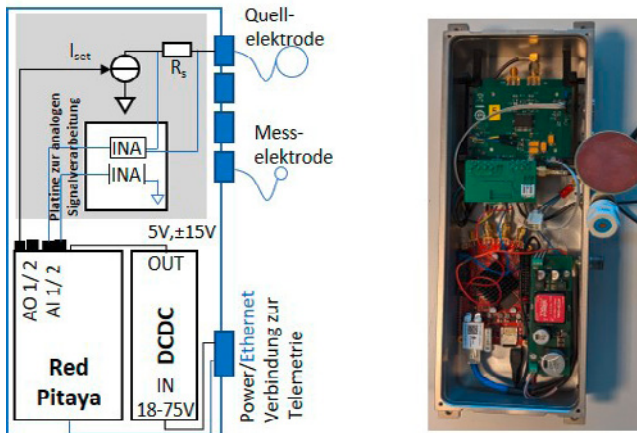


Abb. 3: Blockschaltbild der EIT-Kommunikationsboxen. © IEEE

Die Quellelektroden erzeugen sinusförmige Signale mit einer einstellbaren Frequenz f_0 . Die Messwerte, Amplitude und Phase, werden über den MQTT-Broker zur zentralen Verarbeitung gesendet.

2.2. ALTIMETER

Drei Altimeter messen den Abstand des Sensorträgers vom Boden, um die Plattform parallel zum Meeresboden zu positionieren. Zudem ist der Abstand zum Meeresboden ein wichtiger Parameter, der später für die Algorithmen zur Datenfusion verwendet wird und genau auf den Bodenbetrieb der Multisensor-Plattform abgestimmt ist. Die Altimeter verfügen über eine serielle Schnittstelle (RS 232) zur Steuerung und Datenerfassung. Um mit diesen Sensoren zu kommunizieren, wurde ein einstellbarer Adapter entwickelt, der Daten über MQTT an serielle Schnittstellen weiterleitet. In unserer Multisensor-Plattform sind die Altimeter je mit einem der RedPitaya-Boards in den EIT-Sensorboxen verbunden, um den Aufbau effizienter zu gestalten.

2.3. ANALOGE ULTRASCHALL TRANSDUCER

Die analogen Ultraschallwandler werden ebenfalls mit einer Sensorbox betrieben und über die zentrale Einheit gesteuert. Das Ultraschallsensorsystem arbeitet mit Breitbandimpulsen im Bereich von 90-150kHz. Die Signale dringen in den Boden ein. Für die Lokalisierung flach vergrabener Objekte wird ein Spektralmodell genutzt. Über das Modell werden die Spektren der empfangenen Ultraschallimpulse für unterschiedliche Objektgeometrien berechnet und eine Detektion und Lokalisation mit Fingerprint-Verfahren durchgeführt.

Die Ultraschallwandler befinden sich in einer Ecke der in Abbildung 2 dargestellten Multisensor-Plattform. Es wurde auf einen maximalen Abstand zu den Altimetern an den anderen drei Ecken geachtet, um die gegenseitige Beeinflussung der akustischen Sensorensysteme zu verringern. Außerdem liegt die Betriebsfrequenz der Altimeter in einem höheren Frequenzbereich.

2.4. MAGNETFELDSENSOREN

Leistungskabel aber auch magnetisierte Kabel generieren ein Magnetfeld, das mit Magnetfeldsensoren gemessen werden kann. Die für den Aufbau genutzten Sensoren haben je eine Auflösung von besser als 10^{-6} T in alle drei Raumdimensionen. Sie bestimmen kontinuierlich das Magnetfeld und übermitteln ihre Daten über einen Adapter an den Broker. Über die Magnetfeldvektoren und Triangulation wird die Position des vergrabenen Kabels berechnet.

2.5. INN

Das INN-Messprinzip verwendet einen Neutronengenerator (NG) zur Erzeugung von $<1 \mu\text{s}$ andauernden Pulsen von etwa 30 Millionen Neutronen mit einer Anfangsenergie von 14,1 MeV. Die näherungsweise isotrop abgestrahlten Neutronen breiten sich im umliegenden Medium aus und werden durch Interaktionen mit dessen Atomkernen abgebremst und absorbiert, wodurch der Gesamtneutronenfluss nach dem Puls exponentiell abnimmt. Die im Medium vorhandenen Nuklide bestimmen den zeitlichen Ablauf dieses Prozesses: Wasserstoff (^1H) bremst besonders effektiv Neutronen ab, während Bor (^{10}B)

und Chlor (^{35}Cl) abgebremste Neutronen besonders effektiv absorbieren. Außerdem können Atomkerne bei der Interaktion mit Neutronen in angeregte Energieniveaus versetzt werden. Beim Zurückfallen in den Grundzustand wird für das Nuklid charakteristische Gammastrahlung emittiert. Hierbei erzeugen frisch generierte schnelle Neutronen ein unterschiedliches Gammaspektrum als bereits abgebremste langsame („thermische“) Neutronen.

Beim klassischen INN-Verfahren werden zwei Neutronen-Detektoren in verschiedenen Abständen zum Neutronengenerator eingesetzt, die den lokalen zeitlichen Verlauf des Neutronenflusses aufzeichnen. Da der Gesamtneutronenfluss mit dem Gesamtgammafluss korreliert, verwenden wir zur Detektion der Abklingkurve Gammadetektoren, wodurch wir zusätzlich Gammaspektren detektieren können.

Der Aufbau der INN-Sonde ist in Abbildung 4 dargestellt. Zur Vermeidung störender Gamma-Signale werden zum Bau der Sonde Kunststoffe wie Polyethylen (PE) und Polyoxymethylen (POM) eingesetzt und auf Stahl oder Aluminium verzichtet.

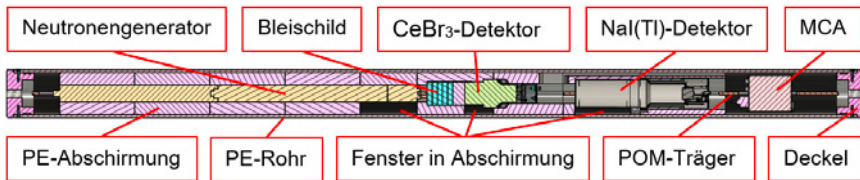


Abb. 4: Aufbau der INN-Sonde.

Der nahe Detektor ist ein CeBr_3 -Szintillator-Kristall, der über sehr gute Umwandlungseffizienz, Energie- und zeitliche Auflösung verfügt. Der ferne Detektor ist ein NaI(Tl) -Szintillator-Kristall mit integriertem MCA, der durch sein großes Volumen gut den schwächeren Gesamtfluss im größeren Abstand detektieren kann. Beide Detektoren verfügen über Ereignis-basierte Detektion. Hierbei wird nicht über die Zeit integriert gemessen, sondern jedes einzelne Signal wird mit Zeitstempel abgespeichert. Dies ermöglicht die spätere Analyse der Daten mit flexiblen Zeitfenstern, um das Gammaspektrum der schnellen Neutronen von dem der langsamen Neutronen zu trennen und Zeitschritte für die Abklingkurve einzustellen.

Zur Abschirmung der Gammastrahlung, die durch Neutroneninteraktionen mit dem NG-Material (z.B. Kupfer und Stahl, die auch in Seekabeln vorhanden sind) erzeugt wird, wurde zwischen NG und erstem Detektor ein Bleischild und ein PE-Platzhalter platziert. Alle Teile wurden in einer POM-Trägerplatte mit passgenauen Aussparungen stabil positioniert und in einem PE-Rohr wasserdicht verpackt. Die PE-Füllung wurde auf Höhe des neutronenemittierenden Bereichs des NG und der Detektor-Kristalle unterbrochen, um Strahlung besser durchzulassen. Hierdurch ergibt sich eine Vorzugsrichtung, die Richtung Meeresgrund ausgerichtet werden muss.

Zur Überprüfung des Messprinzips finden Simulationen mit der Strahlungstransport-Software MCNP statt. Ergebnisse und Geometrieaufbau einer Beispielrechnung mit 5 Milliarden Teilchenhistorien sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Modellierung beinhaltet den detaillierten Aufbau und die Materialzusammensetzung des NG und eines Beispiel-Kabels (Drehstromkabel vom Windpark Baltic 1 mit 23,5 cm Durchmesser). Der Boden wurde vereinfacht als SiO_2 -Sand dargestellt, dessen Wassergehalt auf Bohrkern-daten aus der Nordsee basiert. Für die dargestellten Ergebnisse wurde eine Variante mit einem niedrigen Wasseranteil von 4,02% verwendet. Das Wasser hat die Zusammensetzung von Standard-Meerwasser mit Salinität von 35g/kg.

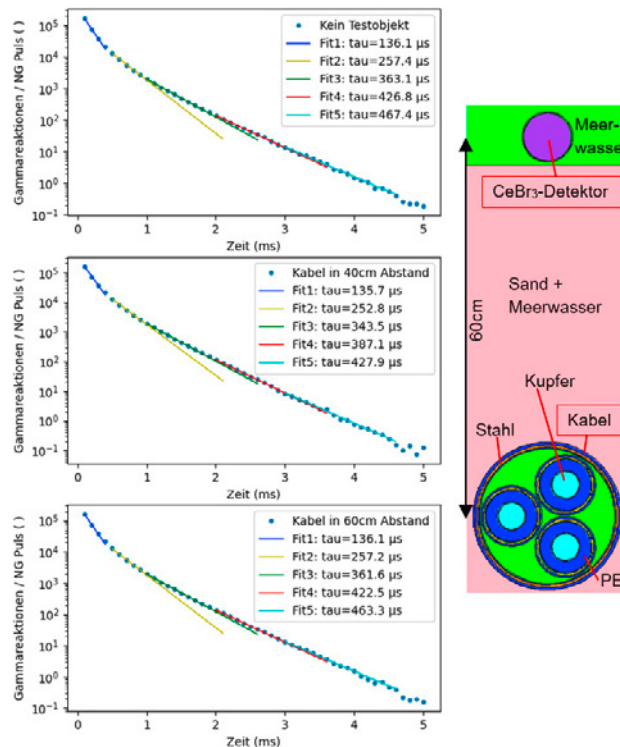


Abb. 5: Die über fünf Pulse gemittelte Abklingkurve jeweils ohne Testobjekt (oben links), mit einem Kabel in 40cm Abstand (mittig links) und mit einem Kabel mit 60cm Abstand (unten links; ein Schnitt durch die MCNP-Geometrie ist rechts dargestellt).

Es wurden fünf aufeinander folgende NG-Pulse im Abstand von 50ms simuliert. Der zeitliche Verlauf der Gammareaktionen im Volumen des CeBr_3 -Kristalls wurde über Zeitabschnitte von 0,1 ms integriert für jeden Puls aufgezeichnet und über die fünf Pulse gemittelt. Die erhaltenen Daten wurden gegen die Zeit aufgetragen und ein abschnittsweiser Fit mit der Gleichung des exponentiellen Abfalls mit Abklingkonstante τ durchgeführt.

Zu sehen ist, dass es eine Überlagerung zwischen dem schnelleren Abklingen im Meerwasser oberhalb der Sonde und dem langsameren im Boden unterhalb gibt. Im ersten

Abschnitt ist die Abklingkurve vom Meerwasser dominant und kein Einfluss des Testobjekts feststellbar. Beim Vergleich der Abklingkonstante τ der späteren Abschnitte zeigt sich bei 40cm Abstand ein starker Einfluss und bei 60cm ein abgeschwächter Einfluss des Kabels auf die Abklingkurve. Wir erwarten, dass durch Mittelung über mehr Pulse eine höhere Eindringtiefe erzielt werden kann. Beim echten Meeresboden ist allerdings auch mit wechselhafter Bodenbeschaffenheit und Zusammensetzung zu rechnen, was zusätzliche Störfaktoren darstellt, die erst in der experimentellen Erprobung im Meer untersucht werden können.

Zur Weiterentwicklung der Sonde und der Analysesoftware werden zunächst Laborversuche durchgeführt. Hierzu wurde ein ehemaliges Neutronenforschungs-Gebäude des Karlsruher Instituts für Technologie angemietet. Ein mit Salzwasser gefüllter Gartenpool dient als Versuchsort und als Strahlungsabschirmung. Es stehen Kabelstücke verschiedenen Typs als Testobjekte zur Verfügung. Die Dichtheit der Sonde und die Signalübertragung wurden im Wasser erprobt und die Messungen begonnen.

2.6. OCU

Die entwickelte optische Kontrolleinheit besteht aus drei wesentlichen Elementen (Abb. 6): (1) ein Zoom-Kamera-Modul, das ein Video-Stream von der Unterwasserumgebung an einen PC an Bord des Schiffs überträgt, (2) zwei LED-Leuchten, die für das notwendige Licht unter Wasser sorgen und deren Beleuchtungsstärke mittels des PCs an Bord gesteuert werden kann und (3) zwei Motoren, die die Kamera und LEDs horizontal und vertikal lenken.



Abb. 6: Optische Kontrolleinheit mit 1 – Kamera, 2 – Beleuchtung und 3 – integrierte Motoren

Eine Steuerkarte übernimmt die Steuerung der einzelnen Motoren, der Kamera und der Beleuchtung, indem die Steuerkarte über eine RS232 Schnittstelle mit einem Einplatinenrechner (Beaglebone Black) kommuniziert (Abb. 7). Die Befehle des Einplatinenrechners werden von der Steuerkarte interpretiert und entsprechend an den Motoren gesendet, um die OCU nach rechts oder links bzw. oben und unten zu bewegen, oder um die Intensität der Beleuchtung einzustellen. Auch der Zoom und Fokus der Kamera kann so gesteuert

werden. Die Steuerkarte sendet dann entsprechend den Status der aktuellen Richtung der Motoren, die Intensität der Beleuchtung und die Kamerainformationen zurück an den Einplatinenrechner.

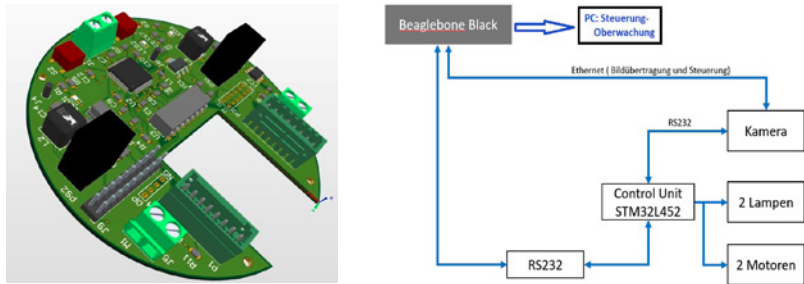


Abb. 7: Die entwickelte Steuerkarte (links) und die Schnittstelle zwischen der Steuerkarte und dem Einplatinenrechner (Beaglebone Black, rechts).

Darauf aufbauend wurde eine Oberflächen-Software erstellt und integriert, womit die OCU vom PC steuerbar ist (Abb. 8).

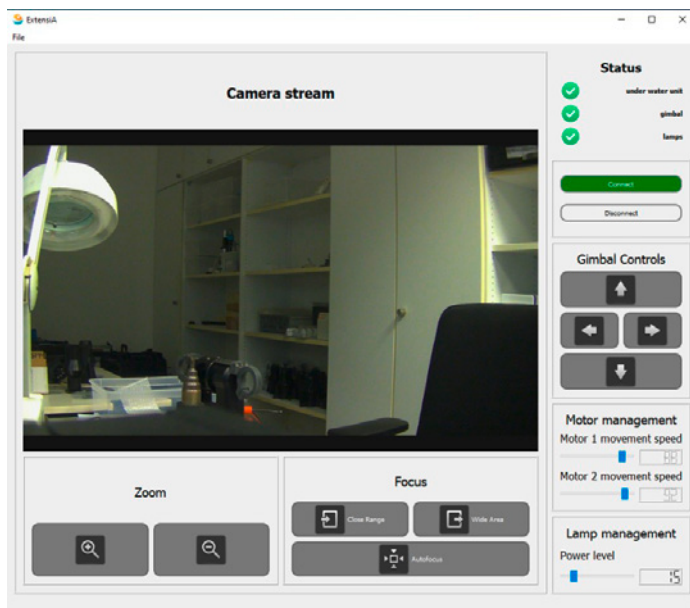


Abb. 8: Steuersoftware der OCU. Die Software zeigt das Kamerabild (Mitte), steuert die Richtung der Motoren durch Pfeiltasten (rechts – Gimbal Controls), die Geschwindigkeit der Motoren (rechts), die Beleuchtung (rechts unten) sowie Zoom und Focus der Kamera (unter dem Kamerabild).

2.7. ZEITMULTIPLEX DER DATENAUSLESE

Um das Übersprechen und die Beeinflussung zwischen den Sensoren der Multi-sensor-Plattform zu reduzieren, wurde ein Zeitmultiplexverfahren (*Time-Division Multiplexing - TDM*) entwickelt. Das TDM legt aktive Zeitabschnitte für die jeweiligen Sensoren

fest. In der Darstellung nehmen wir an, dass sich auf der Plattform sechs Sensoren mit Namen S_i befinden. Mehrere der Sensoren können nicht gleichzeitig mit anderen arbeiten, so würden sich bspw. S_1 , S_2 und S_3 beeinflussen. Deswegen werden Gruppen G_i aus diesen beeinflussenden Sensoren gebildet: $G_1 = \{S_1, S_2, S_3\}$, $G_2 = \{S_4, S_5\}$, $G_3 = \{S_6\}$ (Abb. 9).



Abb. 9: Beispielhaftes Zeitmultiplex TDM für die Multisensor-Plattform. © IEEE

Das Schema wird von dem Sensor-Controller festgelegt. Dieser sendet dann Startnachrichten an die Sensoren, die in der aktuellen Zeitscheibe aktiv sind und deaktiviert diese nach Ablauf der Zeitscheibe über Stopnachrichten. Die Länge der Zeitscheiben werden durch die Statusmeldung von den aktiven Sensoren dynamisch flexibel ermittelt. Die maximale Zeitscheibendauer wird im Sensor-Controller festgelegt und regelmäßig überprüft.

2.8. FUSION: PARALLELE VERARBEITUNG VON ASYNCHRONEN DATENEREIGNISSEN

Für die Datenverarbeitung werden die eingehenden Nachrichten der Multisensor-Plattform verarbeitet.

Die Sensordaten-Fusion erfolgt echtzeitfähig über eine ereignisgesteuerte Architektur (Event-driven Architecture EDA). Die EDA besteht aus drei Teilsystemen, die in Abbildung 10 dargestellt sind.

Die Echtzeitdatenverarbeitung und die Sensordatenfusion ist im Complex Event Processing (CEP) der EDA implementiert. Das CEP behandelt die asynchron eintreffenden Sensordaten als Ereignisse. Die ankommenden Sensordaten werden kombiniert und gemeinsam anhand eines vordefinierten Regelwerks ausgewertet. Aus den Ereignissen resultieren als Ergebnis z. B. die Lage eines metallischen Objekts, aber auch Aktionen, z. B. eine weitere Sensormessung, oder eine Anzeige auf der Benutzeroberfläche. Daten, die laut Regelwerk nach der Verarbeitung nicht mehr benötigt werden, werden verworfen.

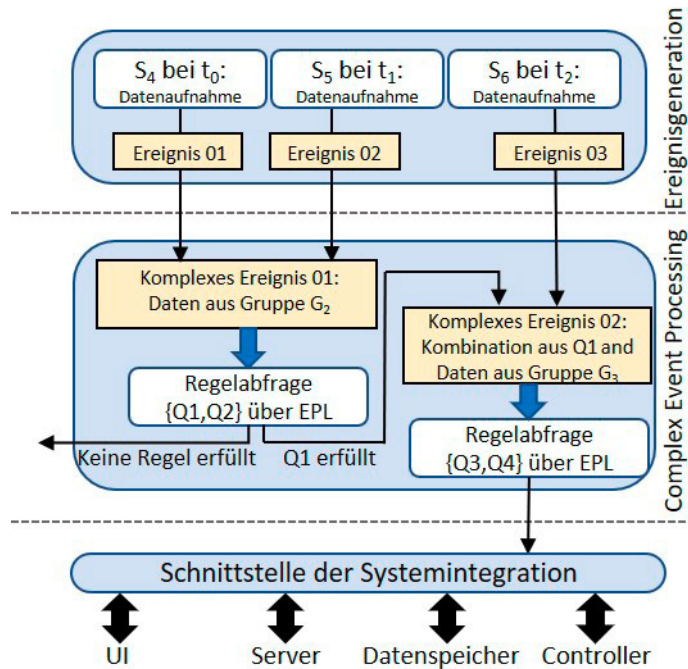


Abb. 10: Ereignisgesteuerte Architektur für die Datenverarbeitung. © IEEE

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Um Unterwasserkabel und andere anthropogene Gegenstände im Sediment von Gewässern besser lokalisieren und identifizieren zu können, wurde eine Multisensor-Plattform entwickelt. Die Kombination unterschiedlicher Sensoren soll den Ungenauigkeiten heutiger Systeme in Bezug auf Ortung und un spezifizierte Fremdkörpern entgegenwirken. Dazu wurden das in der Medizintechnik genutzte bildgebende Verfahren der Elektrische Impedanz Tomographie (EIT), das zur Erdölexploration in Bohrlöchern genutzte Impuls-Neutron-Neutron (INN) Verfahren und ein 3D Videosystem (optische Kontrolleinheit - OCU) für diese spezielle Anwendung entwickelt. Die Multisensor-Plattform wird vervollständigt mit Altimetern, Ultraschallsensoren, Magnetfeldsensoren und einer CTD-Sonde. Diese einzelnen Geräte können mittels Adapter mit der dafür entwickelten Unterwasser-Telemetrie-Einheit verbunden werden, die als Stromversorgung dient und eine Ethernet-Verbindung zur Sensorsteuerung und Datenverarbeitung auf dem Schiff herstellt. Die zeitliche Datenauslese und Fusion der Dateneignisse dieser Sensoren wurde mittels eines Zeitmultiplexverfahren und eines MQTT-Protokolls ermöglicht.

Bis zum Projektende (30.09.2023) wird die letzte Projektphase der Validierung und Evaluation des Systems umgesetzt. Dazu sind Labor- und Feldtest in der Nord- und Ostsee geplant. Das EIT-Array, Magnetfeldsensoren und das Unterwassersonar werden dabei die Lage, Positionierung und Objektgeometrie darstellen. Der INN-Sensor gibt er-

gänzend Auskunft über die Materialbeschaffenheit und Altimeter, OCU und CTD sorgen für die Sicherheit beim Einsatz. Durch den forcierten Ausbau von Offshore-Windanlagen für die Gewinnung von nachhaltiger Energie wird die Multisensor-Plattform eine einzigartige Möglichkeit für die Vorerkundung und der Wartung der Anlagen bieten.

DANKSAGUNG

Das Verbundprojekt EXTENSE wurde durch die Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz ermöglicht. Dafür möchten sich alle Projektbeteiligten herzlich bedanken. Dieser Dank gilt ebenso den Mitarbeitern des Projekträger Jülich, die das Vorhaben administrativ unterstützen.

LITERATUR

- [1] Evaluation of an Electrical Impedance Tomography Model for Underwater Object Detection, Sven Ole Schmidt and Fabian John and Horst Hellbrück, OCEANS Conference 2022 – Hampton Roads, 1–6, 2022.
- [2] Multisensor Platform for Underwater Object Detection and Localization Applications, Fabian John and Sven Ole Schmidt and Horst Hellbrück, OCEANS Conference 2022 – Hampton Roads, 1-6, 2022.
- [3] Evaluation of 3-dimensional Electrical Impedance Tomography-Arrays for Underwater Object Detection, Sven Ole Schmidt and Fabian John and Horst Hellbrück, OCEANS Conference 2022 - Chennai, 1–6, 2022.
- [4] Spectral Ultrasonic Underwater Buried Object Detection and Localization, Fabian John and Sven Ole Schmidt and Horst Hellbrück, OCEANS Conference 2022 - Chennai, 1–7, 2022.
- [5] Effect of Object Diameter Specific Reflections to Underwater Ultrasonic Multipath Diffraction Measurements, Hauke Petersen and Fabian John and Horst Hellbrück, Student Conference on Medical Engineering Science, 2022
- [6] Feature Identifier for Underwater Ultrasonic Multipath Diffraction Model, Garrett Mulkerin and Fabian John and Horst Hellbrück, Student Conference on Medical Engineering Science, 2022.
- [7] Underwater Ultrasonic Multipath Diffraction Model for Short Range Communication and Sensing Applications with Reflector, Lukas Paul Schön and Fabian John and Horst Hellbrück, Student Conference on Medical Engineering Science, 2022.
- [8] Flexible Arbitrary Signal Generation and Acquisition System for Compact Underwater Measurement Systems and Data Fusion, Fabian John and Sven Ole Schmidt and Horst Hellbrück, Global Oceans 2021: San Diego - Porto, 1-6, 2021.
- [9] High Precision Open Laboratory 3D Positioning System for Automated Underwater Measurements, Fabian John and Sven Ole Schmidt and Horst Hellbrück, Global Oceans 2021: San Diego - Porto, 1-5, 2021.
- [10] Underwater Ultrasonic Multipath Diffraction Model for Short Range Communication and Sensing Applications, Fabian John and Marco Cimdins and Horst Hellbrück, IEEE Sensors Journal 21, 20, 22934-22943, 2021.
- [11] Gigahertz Ground Penetrating Radar (GPR) for Sediment Exploration, Elsner, Christian and Fabian John and Hellbrück, Horst, 2021.
- [12] Object Localization in Seawater via Electrical Impedance Measurements, Lindenberg, Arthur-Vincent and Ardelt, Gunther and Fabian John and Hellbrück, Horst, 2021.
- [13] Differential Ultrasonic Detection of Small Objects for Underwater, Fabian John and Roman Kusche and Felix Adam and Horst Hellbrück, Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, 1-7, 2020.

- [14] Development of an Electro Impedance Tomography-based Platform for Measurement of burial Depth of Cables in Subsea Sediments, Andreas Schuldei and Fabian John and Gunther Ardelt and Tim Suthau and Horst Hellbrück, Oceans 2019, 2019.

TSCHALL

TIEFFREQUENTE SCHALLABSTRAHLUNG VON MASCHINENGERÄUSCHEN INS WASSER

AUTOREN

DR.-ING. DIETRICH WITTEKIND	DW-SHIPCONSULT GMBH
DIPL.-ING., MBA	DW-SHIPCONSULT GMBH
THOMAS BÜCHLER	
M.SC. JOHANNA DANIEL	DW-SHIPCONSULT GMBH
DIPL.-ING. MAX SCHUSTER	DW-SHIPCONSULT GMBH

EINLEITUNG

Ziel des Verbundprojektes war es, die prinzipielle Gesetzmäßigkeit der tieffrequenten Schallanregung, -ausbreitung und -abstrahlung von Maschinengeräuschen über den Schiffsrumpf ins Wasser und deren Beeinflussbarkeit zu untersuchen und in einem Prognosemodell umzusetzen. Der Schwerpunkt des Vorhabens lag auf tiefen Frequenzen, da Maschinengeräusche neben dem Propeller die zweitlauteste Quelle sind.

Hinsichtlich des abgestrahlten Unterwasserschalls existierten schon zur Zeit der Projektdefinition neben individuell vereinbarten Vorgaben Klasse Notationen, welche den abgestrahlten Unterwasserschall (URN) spezifizieren. Einige derzeit oft genutzte Notationen sind die DNV SILENT R für Forschungsschiffe, DNV SILENT S für hydroakustische Explorationsschiffe und DNV SILENT E für alle Schiffe. Die Einhaltung dieser Notationen oder vergleichbarer individueller Vorgaben wird in Neubauverträgen durch den Kunden spezifiziert. Eine solche Spezifikation war bislang bei Militärschiffen und Forschungsschiffen üblich. Seit 2019 werden in Europa verstärkt SILENT E Notationen für Kreuzfahrtschiffe oder Mega-Yachten spezifiziert. Ziel dabei ist es, so den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren, dieses durch ein Zertifikat an die Endkunden zu kommunizieren und damit ein nachhaltiges Alleinstellungsmerkmal zu generieren. Weiterhin erlauben derartige Zertifikate eine Fahrterlaubnis in besonders empfindliche Gebiete (z. B. Polargebiete) zu erhalten, in denen es bereits jetzt Vorgaben zu zulässigen URN Signaturen gibt. Bestrebungen zur Reglementierung des abgestrahlten Unterwasserschalls werden derzeit innerhalb der IMO (International Maritime Organisation) unter Leitung Kanadas vorangetrieben (<https://northsearegion.eu/jomopans/news/mepc2020/>). Die Kontrolle des abgestrahlten Unterwasserschalls ist daher eine unabdingbare Fähigkeit für den deutschen Schiffbaustandort, um sich weiterhin als Technologieführer auf dem Weltmarkt zu behaupten.

Eine solche Kontrolle umfasst:

- › Die frühzeitige und hinreichend genaue Prognose des abgestrahlten Unterwasserschalls
- › Das Erkennen, Benennen und Quantifizieren von etwaigen akustischen Risiken
- › Die Entwicklung von zielgenauen, angepassten Gegenmaßnahmen an den dominierenden Quellen oder kritischen Übertragungswegen
- › Die baubegleitende Überprüfung und Korrekturen bei Abweichungen.

Die frühzeitige und hinreichend genaue Prognose ist daher der Dreh- und Angelpunkt einer jeden akustischen Schiffbaukontrolle.

Unterwasserschallprognosen wurden bislang anhand von semiempirischen Modellen durchgeführt, die über Jahrzehnte als wissenschaftlicher Standard galten. Ein Kernelement dieser Formeln ist der Abstrahlgrad der Schiffsstruktur. Der Abstrahlgrad ist jedoch im frühen Schiffbauprojektstadium schwer zu ermitteln. Eine solche Unsicherheit in der Prognose muss zwangsläufig durch einen Risikoaufschlag bei der Planung von Schallgegenmaßnahmen kompensiert werden. Dies bedeutete beispielsweise, dass Fundamente zuweilen unabhängig von ihren Festigkeitserfordernissen steifer und schwerer gestaltet wurden, als dieses aus rein akustischen Gesichtspunkten nötig gewesen wäre. Dies hatte Gewichts- und Kostensteigerungen zur Folge.

Durch die Schaffung eines neuen und validierten Prognosemodells sollte innerhalb TSCHALLs die Prognose des abgestrahlten maschineninduzierten Unterwasserschalls mit einer Genauigkeit von + 5 dB unterhalb von 250Hz ermöglicht werden. Durch eine solch hohe Prognosegenauigkeit sollen Schiffbauunternehmen einerseits in die Lage versetzt werden, mit hoher Verlässlichkeit geforderte Spezifikationen des Unterwasserschalls einhalten zu können. Zeitgleich soll es ihnen ermöglicht werden, sich bei der Planung der akustischen Gegenmaßnahmen auf das absolut Notwendige zu beschränken, um so Gewichts- und Kosteneinsparungen realisieren zu können.

Das Vorhaben wurde in drei Schritten durchgeführt:

1. Schaffung eines vorläufigen Prognosemodells auf Basis bereits vorhandener Messdaten, empirischen Formeln und Finite Elemente Rechnungen, welches die physikalischen Zusammenhänge korrekt abbildet.
2. Unterwasserschallmessungen an verschiedenen Schiffen mit gleichzeitiger Messung des maschineninduzierten Körperschalls und Luftschalls an Bord.
3. Validierung des Prognosemodells mit Hilfe der Messdaten.

2. SCHAFFUNG EINES VORLÄUFIGEN MODELLS

Ursprüngliche Modelle basierten auf dem klassischen Ansatz der Biegewellenabstrahlung von Strukturen. Für eine genaue Prognose benötigte man die abstrahlende Fläche, den mittleren Körperschall auf der Fläche und den Abstrahlgrad. Alle drei Einflussgrößen sind schwer bestimmbar. Die Anwendung des Modells ist immer mit empirischen Annahmen verbunden, die man mit Messungen nur teilweise validieren kann. Abbildung 1 zeigt den klassischen Ausbreitungsweg von elastisch gelagerten Maschinen in die Umgebung. Der Hauptweg über das Fundament dominiert fast immer bei tiefen Frequenzen. Nebenwege über Anschlüsse, wie etwa die Abgasleitung von Dieselmotoren, können beitragen, bei ungünstiger Integration auch dominieren. Bei höheren Frequenzen gibt es auch direkte Übertragung von Luftschall in benachbarte Räume oder in das umgebende Wasser. Betrachtet wird in diesem Vorhaben der Hauptweg. Hier gilt, dass eine elastische Lagerung (Körperschallquelle auf Federn) Wechselkräfte auf das Fundament erzeugt, die unabhängig vom Fundament sind, wenn dieses mehr als 10 mal steifer ist als die Federn. Diese Bedingung wird bei typischen Schiffskonstruktionen fast immer erfüllt. In diesem Fall ist die einzige zu betrachtende Schnittstellengröße die Wechselkraft, die vom Körperschallquellpegel oberhalb der Feder und der dynamischen Federsteife abhängt.

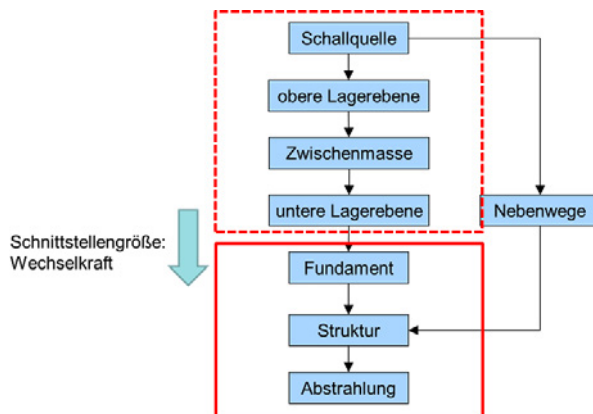


Abb. 1 Körperschallausbreitung von der Maschine bis zur Schiffsaußenhaut und Nebenwege

Der Nachteil an dem Modell ist, dass unterstellt wird, dass der sich aus der Wechselkraftanregung ergebende Körperschall den Pegel im Wasser bestimmt. Beobachtungen zeigen aber, dass der Zusammenhang schwach ist. Theoretische Überlegungen deuten darauf hin, dass die Kraft, die den Körperschall erzeugt, eine bestimmende Größe sein muss. Der Zusammenhang zwischen Kraft und Schallschnelle, die durch diese Kraft hervorgerufen wird, ist die mechanische Impedanz. Entscheidend sind hier die Eingangsimpedanz eines Fundaments und die Übertragungsimpedanz zur Außenhaut, wo die Abstrahlung erfolgt. Es wird beobachtet, dass die Eingangsimpedanz eines Maschinenfundaments sehr unterschiedlich sein kann, während die Übertragungsimpedanz weit weniger variiert.

Alle Beobachtungen zeigen an, dass das Modell für die Abstrahlung von Körperschall mit den zugrunde liegenden physikalischen Überlegungen die Realität nicht hinreichend abbildet, um wesentliche Optimierungen zu ermöglichen. Ein neues Modell müsste auf eine verbesserte physikalische Basis gestellt werden.

Für das neue Modell wurde auf einen bekannten Ansatz der technischen Akustik zurückgegriffen. Er beschreibt analytisch exakt die Abstrahlung einer auf eine unendlich große Platte wirkende Kraft, siehe (1). Eine genaue Analyse des Ansatzes lässt erkennen, dass es bei tiefen Frequenzen keine Abhängigkeit von der Dicke der Platte gibt, sondern nur noch vom Widerstand des Wassers. Der Ansatz benötigt keine Kenntnis eines Abstrahlgrads. Die Schallleistung einer in eine Richtung abstrahlenden unendlichen Platte wird durch folgende Formel definiert (1):

Formel 1: Abstrahlung einer auf eine unendlich große Platte wirkende Kraft

$$P = \frac{|F_0^2| \rho_0 c_0 k_0^2}{4\pi} \int_0^{k_0} \frac{k_r dk_r}{\sqrt{k_0^2 - k_r^2} \cdot [\omega^2 m'^2 \left(1 - \frac{k_r^4}{k_B^4}\right)^2 + \rho_0^2 c_0^2 k_0^2 / (k_0^2 - k_r^2)]}$$

Mit:

- F_0 Kraft [N],
- ρ_0 Dichte des Wassers [kg/m³],
- c_0 Schallgeschwindigkeit des Wassers [m/s],
- $\omega=2\pi f$ Kreisfrequenz [rad/s],
- f Frequenz [Hz].
- k Wellenzahl [rad/m]

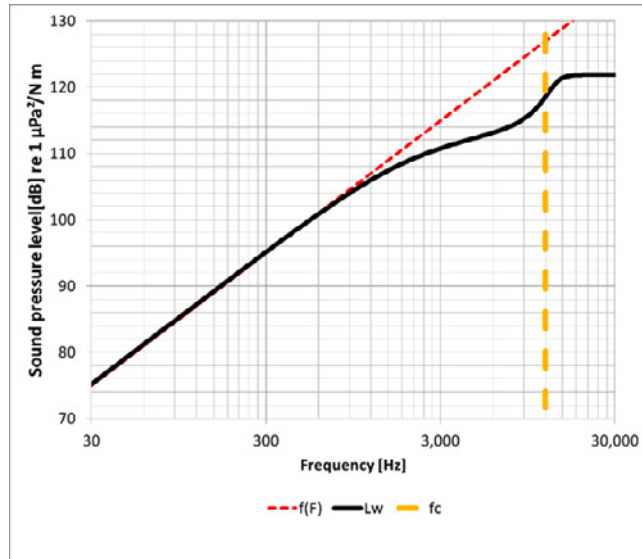


Abb. 2 Abgestrahlte Schalleistung einer durch eine Einzelkraft angeregte, unendlich große, 20 mm dicke einseitig benetzte 30 mm dicke Stahlplatte, L_w =Formel 1, $f(F)$ =Formel 2

Befindet man sich im linken Teil der Grafik aus Abbildung 2 unterhalb der Grenzfrequenz f_c , gekennzeichnet durch die Gerade entsprechend der gelben gestrichelten Linie, kann die Gleichung vereinfacht werden. Es ergibt sich folgende Schalleistung (1):

Formel 2: Vereinfachte Formel zur Abstrahlung einer auf eine unendlich große Platte wirkende Kraft

$$P \approx \frac{|F_0^2| \omega^2}{12\pi \rho_0 c_0^3}$$

Möchte man die Schalleistung P umrechnen in den mittleren Schalldruck p auf einer Kugel mit einem Meter Radius mit einer Fläche A erhält man:

Formel 3: Mittlerer Schalldruck auf einer Kugel mit einem Meter Radius

$$20 \log \frac{p}{p_0} \text{ re } 1 \mu\text{Pa} = 10 \log \frac{P}{P_0} \text{ re } 10^{-12} \text{W} + 10 \log \rho_0 c_0 - 10 \log A + 10 \log \frac{P_0}{p_0^2} = 10 \log \frac{P}{P_0} + 51$$

P_0 und p_0 sind die Bezugswerte für die Schalleistung (üblicherweise 10^{-12} W) beziehungsweise für den Schalldruck (im Wasser üblicherweise $1 \mu\text{Pa}$), A ist die Fläche einer Kugel mit 1 m Radius.

Mithilfe der Finite-Element-Methode (FEM) konnte der theoretische Ansatz nachvollzogen werden. Um die Ergebnisse endlicher Platten denen einer unendlich große Platte gegenüberzustellen, eignet sich die Berechnung der 40x40 m Platte. Das numerische Ergebnis weicht nur bei sehr tiefen Frequenzen vom analytischen Ansatz (2) ab. Ein Vergleich der

unterschiedlichen Plattengrößen untereinander zeigt, dass die Abstrahlung mit kleiner werdender Platte bei zunehmend höherer Frequenz zu verstärkter Abstrahlung tendiert.

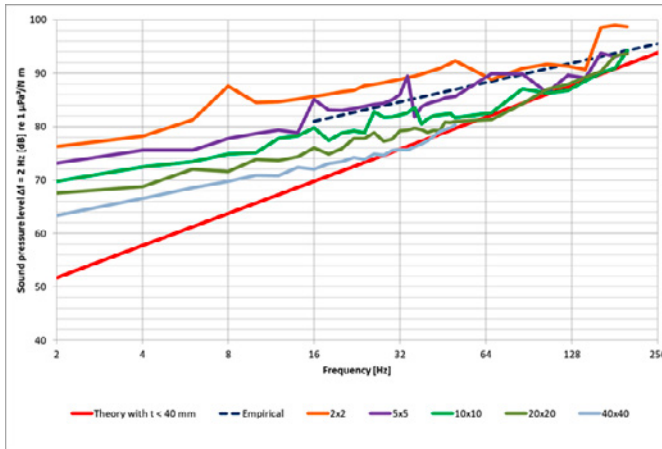


Abb. 3 Abgestrahlter Schalldruckpegel von Rechteckplatten in unterschiedlicher Größe, berechnet mit FEM. Gestrichelt der im Vorhaben verwendete empirischen Ansatz (T-SCHALL Ansatz), rot theoretischer Ansatz aus Formel 3

Im weiteren Projektverlauf wurde der abgestrahlte Schalldruckpegel von Schiffssektionen betrachtet. Hierfür, wurde an dem Finite Elemente Modell einer Schiffssektion an verschiedenen Orten der Struktur eine anregende Kraft aufgebracht und die Übertragungsfunktion von Schalldruck zu Kraft ausgewertet. Abbildung 4 zeigt das Finite Elemente Modell einer Megayacht im Wasserraum mit der Elementierung. Das Modell berücksichtigt die Rückwirkung des Wassers auf das Strukturverhalten. Die resultierende Schallabstrahlung erfolgt nach allen Seiten. Der blaue Bereich ist ein sogenanntes perfectly matched layer, das dafür sorgt, dass keine Schallanteile reflektiert werden. Abbildung 5 zeigt beispielhaft das Schallfeld in der Mittellängsebene des Schiffes bei 16 Hz. Man sieht das stark strukturierte Nahfeld sehr gut über die ganze Schiffslänge, aber in einiger Entfernung ergibt sich eine fast sphärische Schallwelle, in der sich die Nahfelddetails nicht mehr abbilden.

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der FE-Rechnungen von Schiffsstrukturen (div. FEA) denen aus Theorie (Formel) und dem neuen empirischen T-SCHALL Ansatz (T-SCHALL) gegenübergestellt. Es konnte festgestellt werden, dass die Schallabstrahlung nur gering schwankte. Daraus wurde eine empirische Korrektur des analytischen Ansatzes vorgenommen, die die endliche Größe einer Schiffstruktur im Vergleich zu einer unendlich großen Platte abbilden soll.

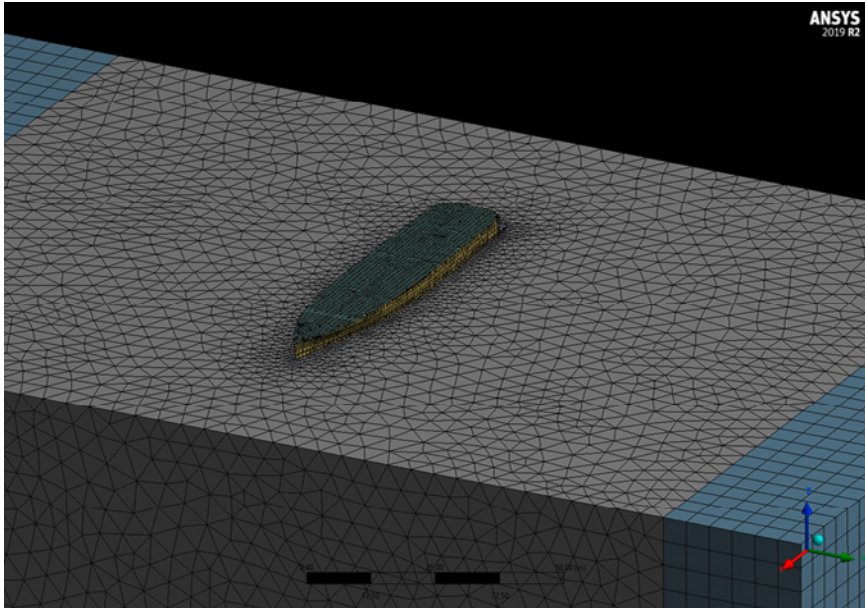


Abb. 4 Schiff mit Element-Vernetzung im Wasserraum

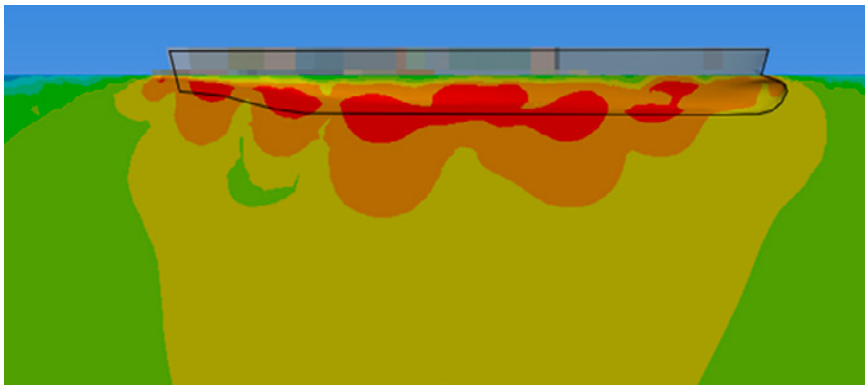


Abb. 5 Abstrahlung des Schiffes unter einer Einzelkraft in der Mitte bei 16 Hz

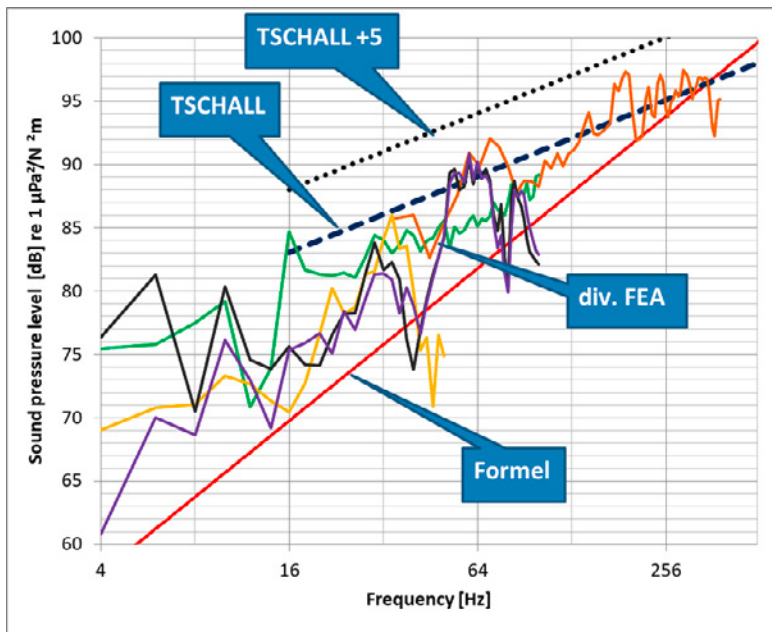


Abb. 6: Vergleich der Prognose des Schallpegels berechnet mit FEM an verschiedenen Schiffsstrukturen und Anregungspunkten zum T-SCHALL Ansatz

Die Kerngleichung und damit das Hauptergebnis des Vorhabens ist folgende Darstellung entsprechend der gestrichelten Linie in Abbildung 6. Sie beschreibt das Übertragungsverhalten zwischen Kräfteanregung und abgestrahlten Unterwasserschalldruckpegel und ist somit eine Übertragungsfunktion TF:

Formel 4: Kerngleichung des T-SCHALL Ansatzes

$$TF \text{ re } 1 \mu\text{Pa}^2/\text{N}^2 \text{ m} = 71 + 10 \cdot \log(f[\text{Hz}]).$$

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, kann die analytische Lösung (rot) als Gerade dargestellt werden, aber die Ergebnisse der numerischen Berechnungen schwanken. Grund ist, dass eine unendlich große Platte keine Eigenfrequenzen hat, ein begrenztes System wie ein Schiff oder eine Schiffssektion aber schon. Im Resonanzfall (Anregungsfrequenz = Eigenfrequenz) wird die anregende Kraft verstärkt und es ergibt sich eine erhöhte Abstrahlung gegenüber dem T-SCHALL Ansatz.

Im Folgenden wird gezeigt, dass diese erhöhte Abstrahlung immer eng begrenzt ist, wenn gewisse Kriterien erfüllt sind. Dies ist üblicherweise der Fall.

Dazu wurden verschiedene neu erstellte Schiffsstrukturmodelle und generische Geometrien, z. B. ein Zylinder, untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass der T-SCHALL-Ansatz annähernd immer gilt, solange die Eingangsimpedanz einen gewissen Benchmark

überschreitet. Ein Unterschreiten des Benchmarks geht mit ausgeprägteren resonanzartigen Erscheinungen einher, die zu erhöhter Abstrahlung führen. Abbildung 7 zeigt vier Berechnungen für vier Punkte auf einer Schiffsstruktur mit unterschiedlichen Eingangsimpedanzen, die im oberen Teil des Diagramms gezeigt sind. Die dicke rote Linie kennzeichnet den Benchmark. Der Wasserschallpegel infolge der Kraftanregung variiert aber weit weniger je höher die Impedanz ist. Eine Überschreitung des T-SCHALL Ansatzes um +5dB kommt praktisch nicht vor, wenn die Impedanz oberhalb des Benchmarks liegt. Wenn die Impedanz deutlich über dem Benchmark liegt, ergibt sich hingegen nur eine geringe oder gar keine weitere Verringerung des abgestrahlten Schallpegels.

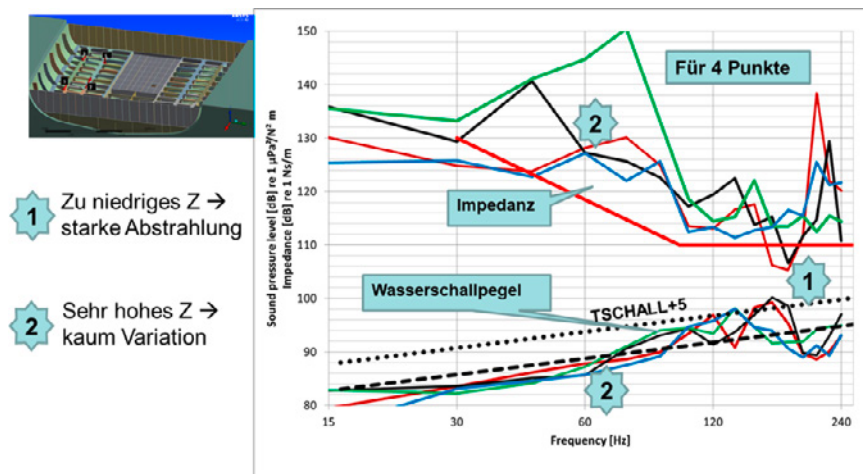


Abb. 7: Einfluss der Impedanz am Ort der Kraft auf den abgestrahlten Schall

Diese Erkenntnis, welche schon in der Schaffung des vorläufigen Prognosemodells gewonnen werden konnte, hat direkt praktische Auswirkungen auf den Schiffbau. Sie bedeutet konkret, dass die maschineninduzierte Schallabstrahlung nicht beliebig durch eine Versteifung des Fundamentes reduziert werden kann. Dies ist nur bis zu dem Punkt möglich, an dem die Impedanz die Benchmark-Impedanz erreicht. Weitere Versteifungen über diesen Benchmark hinaus, die auch zwangsläufig einen Masseeintrag in das Schiff bedeuten, sind aus akustischer Sicht unnötig und können somit vermieden werden.

3. VALIDIERUNG MIT UNTERWASSERSCHALLMESSUNGEN

Das vorläufige Prognosemodell auf Basis der Formel 4, wurde durch Großausführungsmessungen validiert. Zwei Schiffe von Projektpartnern standen dafür zur Verfügung:

1. Eine ca. 80m lange Mega-Yacht.
2. Das Expeditionskreuzfahrtschiff Crystal Endeavor.

Im Folgenden werden nur Ergebnisse des Kreuzfahrers gezeigt, da hier das Geräusch der Dieselmotoren deutlicher sichtbar war, siehe Abbildung 9.

Das Schiff wird von Pods angetrieben, deren Elektromotoren von mehreren einfachelastisch gelagerten Dieselmotoren versorgt wurden.

Die Unterwasserschallabstrahlung wurde auf See mittels einer Messboje vermessen. Diese Messboje wurde in diesem Vorhaben nach Vorgabe hergestellt und dahingehend optimiert, dass auch tiefe Frequenzen gut erfasst werden können und nicht durch Störgeräusche maskiert werden.

Die Messung auf See fand unter erschwerten Bedingungen statt. Das Wasser im Messgebiet war relativ flach (ca. 30 m) und es war schwierig das Schiff in der vorgegebenen Entfernung von 100m vorbeizufahren. Organisatorische Einschränkungen erlaubten außerdem nicht eine systematische Variation der Betriebszustände.

Um aus den gemessenen Unterwasserschallsignaturen eine Aussage für das Prognosemodell treffen zu können, mussten weitere Messungen und Untersuchungen erfolgen.

Durch einen Shaker im Maschinenraum wurde ein Körperschallpegel induziert, dessen Auswirkung ebenfalls unter Wasser im Hafenbecken aufgezeichnet wurde. So konnten beide Übertragungswege getrennt voneinander untersucht werden und zusätzlich auch der T-SCHALL Ansatz mit einem definierten Signal überprüft und validiert werden, siehe Abbildung 8.

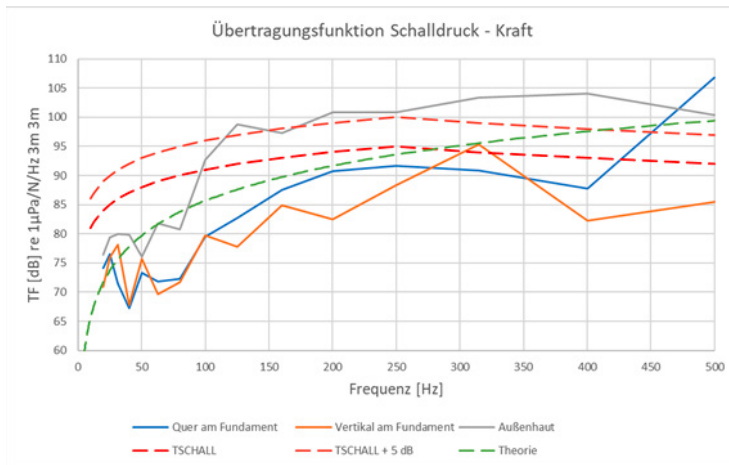


Abb. 8: Vergleich der gemessenen zu T-SCHALL Übertragungsfunktion

Parallel zu den Unterwasserschallmessungen auf See wurden im Maschinenraum Körperschall und Luftschall der Dieselmotoren gemessen, da diese in das Prognosemodell eingehen. Die Körperschallpegel wurden oberhalb und unterhalb der elastischen

Lagerung gemessen, um in Abhängigkeit der Federeigenschaften die wirkende Fundamentkraft ermitteln zu können.



Abb. 9: Kreuzfahrtschiff Crystal Endeavor während der Vermessung

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich zwischen der Messung (grün) und der Berechnung auf Basis der Körperschallpegel auf dem Fundament (schwarz). Man sieht, dass nicht alle Beiträge im Wasser auf dem Fundament sichtbar waren, z. B. bei 25 und 63 Hz. Bei 100, 125 und 163 Hz wurden nur die Linien bei den Harmonischen der halben Dieseldrehfrequenz ausgewertet (blau), da ab etwa 100 Hz der Luftschall der Dieselmotoren den Beitrag des Fundamentausbreitungsweges überwiegt. Als Orientierung in Rot ist die SILENT-R Kurve gezeigt, die das Schiff erwartungsgemäß nicht erfüllen würde.

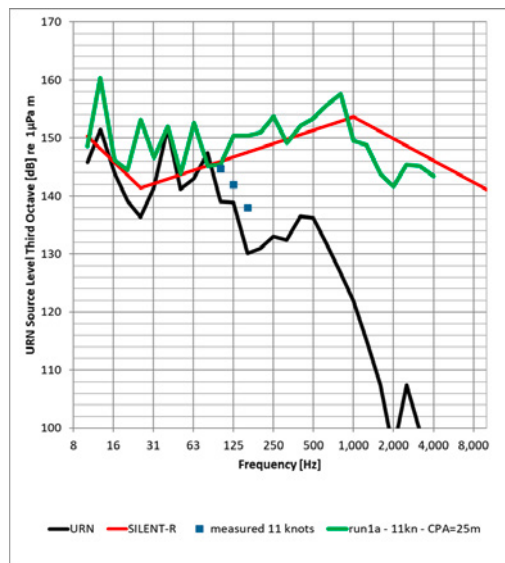


Abb. 10: Messung und Prognose für Endeavor

4. ERGEBNIS: VALIDIERTES PROGNOSEMODELL

Das neue Verfahren und insgesamt die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse verbessern die Prognosequalität bei 30 bis 100 Hz um 5 dB, und zwischen 100-250 Hz um 10 dB. Im Frequenzbereich darüber spielen Maschinengeräusche eine geringe Rolle bzw. sind mit anderen empirischen Verfahren gut beherrschbar. Im Frequenzbereich unter 30 Hz verbleiben Unsicherheiten, die wahrscheinlich in eine noch zu konservative Prognose auch nach dem neuen Verfahren führen. Die betroffene Anregung mit hoher Wechselkrafteinleitung bei Frequenzen bis 30 Hz ist die Drehfrequenz von Dieselgeneratoren.

Das Modell wurde auf ein Schiff angewendet, wo die Körperschallübertragung tiefrequent den Pegel im Wasser bestimmte (Veröffentlicht in (2)). Abbildung 11 zeigt das Ergebnis. und die Prognose nach altem Verfahren im Vergleich zum neu entwickelten

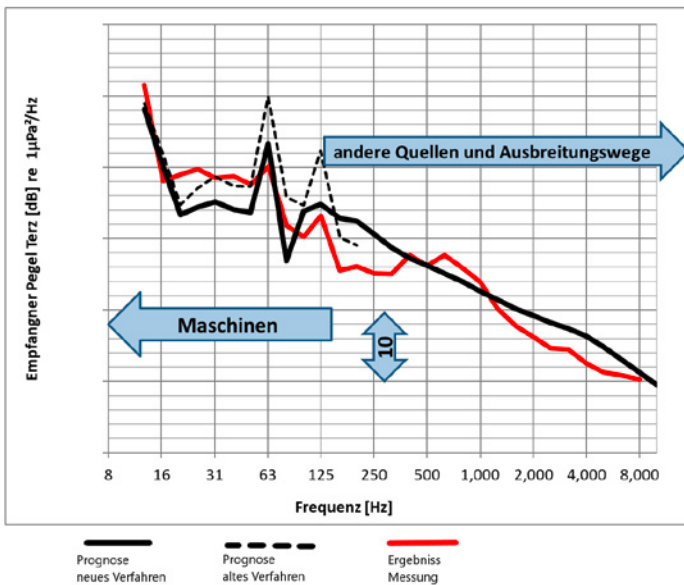


Abb. 11: Vergleich der Prognoseergebnisse mit einer Unterwasserschallmessung

Neben dem neuen, deutlich vereinfachten und genaueren Prognosemodell für den maschineninduzierten abgestrahlten Unterwasserschall hat das Vorhaben wesentliche Erkenntnisse erzeugt:

- › Der maschineninduzierte abgestrahlte Unterwasserschall wird ohne Berücksichtigung eines Abstrahlgrades sehr genau prognostiziert
- › Eingangsgrößen sind einzig die unkorrelierten (phasenlagenunabhängig) Wechselkräfte, die über Federn auf die Schiffstruktur übertragen.

- › Der Körperschallpegel auf dem Fundament ist für den abgestrahlten Unterwasserschall, wie auch den innerhalb des Schiffes wahrnehmbaren Schall, irrelevant.
- › Der maschineninduzierte abgestrahlte Unterwasserschall kann nicht, wie bislang häufig unterstellt, pauschal durch eine Versteifung des Maschinenfundaments (= Erhöhung der Impedanz) verringert werden. Dies gelingt nur bis zu einer Mindestimpedanz. Steigert man die Impedanz darüber hinaus, kommt es zu keiner weiteren Verringerung der Abstrahlung.

5. ANWENDUNG

Das in TSCHALL entwickelte Prognosetool ermöglicht die Vorhersage vom abgestrahlten Unterwasserschall für elastisch gelagerte Maschinen. Basierend auf Kenndaten wie Federsteifigkeit, Anzahl der Lagerungselemente, Maschinenmasse und Körperschall oberhalb der Lagerung, kann eine zuverlässige Prognose für den abgestrahlten Unterwasserschall durch Maschinen getätigt werden. Dies ist vor allem bei der Auswahl eines geeigneten Maschinenkonzepts unter Einhaltung von Unterwasserschallgrenzwerten einer Klasse oder einer individuellen Spezifikation hilfreich.

6. LITERATUR

- [1] L. Cremer, M. Heckl, B.A.T. Petersson. Structure-Borne Sound, Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies. 3rd edition, ISBN 3-540-22696-6 Springer Berlin Heidelberg New York
- [2] Wittekind, D., Schuster, M., Daniel, J. Low frequency underwater radiated noise from shipboard machinery, DAGA 2021

SCIPPER

SCHLEUSENASSISTENZSYSTEM BASIEREND AUF PPP UND VDES
FÜR DIE BINNENSCHIFFFAHRT

AUTOR

DR. ALEXANDER LUTZ	ARGONICS GMBH
DR. MICHAEL SCHRÖDER	BAW – BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU
JÜRGEN ALBERDING	ALBERDING GMBH
DR. RALF ZIEBOLD	DLR – DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, NEUSTRELITZ
DR. RONALD RAULEFS	DLR – DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, OBERPFAFFENHEIM
DR. MARTIN SANDLER	ARGONAV GMBH
JÜRGEN ZIMMERMANN	WEATHERDOCK AG
MICHAEL HOPPE	GDWS – GENERALDIREKTION WASSERSTRASSEN UND SCHIFFFAHRT

1. EINLEITUNG

Die Schleusung ist eines der häufigsten aber auch kritischsten Manöver in der Binnenschifffahrt. Typisch für die Wasserstraßen in Deutschland ist die Situation, dass ein 11,40m breites Schiff in eine 12m breite Schleusenkammer einfährt. Die Zeit, die das Schiff für die Schleuseneinfahrt und -ausfahrt benötigt, kann einen beträchtlichen Teil der Fahrtzeit bis zum Zielort einnehmen. Eine Automatisierung dieses Vorgangs zielt zum einen auf eine Erhöhung der Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und zum anderen auf eine Beschleunigung des gesamten Schleusungsvorganges ab.

Technologische Basis für die neue Fahrerassistenzfunktion ist die Bereitstellung von zuverlässigen und hochgenauen Informationen zur Position, Lage und Geschwindigkeit des Binnenschiffes. Die hierfür notwendigen Korrekturdaten sollten über den neuartigen VHF Data Exchange (VDE)-Datenkanal zur Verfügung gestellt werden. Der VDE-Datenkanal ist Bestandteil des neuen VHF Data Exchange-Systems (VDES). VDES offeriert ein bidirektionales Kommunikationssystem zwischen Schiffen, zwischen Schiffen und Landstationen sowie zwischen Schiffen und Satelliten. Der VDE-Datenkanal eröffnet mit seinen zusätzlichen Übertragungskapazitäten neue Perspektiven für die Binnenschifffahrt. Da es hierfür weltweit noch keine Produkte für die Sende- und Empfangseinheiten gibt, bat sich hier die Möglichkeit, anhand einer konkreten Pilotanwendung innovative Technologien für zukünftige Produkte zu entwickeln.

Darüber hinaus sollte das Assistenzsystem mit Nahbereichssensorik ausgestattet werden, um im Falle von Ausfällen des GNSS dennoch eine zuverlässige Positionierung zu ermöglichen. Insbesondere im Unterwasser hoher Schleusenbauwerke sowie unter Brücken kommt es regelmäßig zu Abschattungen der Satellitensignale und damit zu Schwierigkeiten in der Positionierung durch GNSS. Der Einsatz von relativen Messeinrichtungen wie KFZ-Radar und LiDAR-Scannern sollte deshalb die Positionierung in Schleusennähe ergänzen.

Dieser Bericht basiert auf Auszügen von (Schröder, Höfler, Leutz & Bernath, 2022), (Lachmeyer & Lutz, 2022), (Zibold, Lass, An, Raulefs & Wirsing, 2022), (Alberding, Uhlemann & Zimmermann, 2022), (Karbach & Hoppe, 2022)

2. KONZEPTIONIERUNG

Das Manöver der Ein- und Ausfahrt wurde abhängig von der Verfügbarkeit der absoluten und relativen Messsysteme sowie vom verfügbaren Manörraum in fünf Phasen eingeteilt (siehe Abbildung 1):

Phase 1: Start des Manövers im Vorhafen, Ausrichtung der Position und Lage des Schiffes auf das Schleusentor bzw. die Mittelachse der Schleuse, Anfahrt in Richtung Schleusentor

Phase 2: Erreichen der notwendigen Positions- und Lagegenauigkeit vor der eigentlichen Einfahrt in die Schleuse. Wird am Ende von Phase 2 die Genauigkeit nicht erreicht, wird ein Alarm ausgegeben. Der Schiffsführer muss dann das Manöver abbrechen und die Steuerung komplett übernehmen.

Phase 3: Durchfahrt durch das Schleusentor, Manövrieren in der Schleusenammer, Aufstoppen des Schiffes

Phase 4: Ausfahrt aus der Schleuse

Phase 5: Manövrieren im Vorhafen, Übernahme der Steuerung durch den Schiffsführer oder Aufstoppen

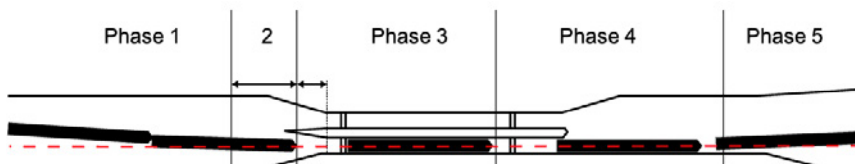


Abb. 1 Manöverphasen

Durch den oben definierten Ablauf ergeben sich unterschiedliche Anforderungen der Regelung an die Genauigkeit der Positions- und Lageerfassung in den verschiedenen

Phasen einer automatisierten Schleusenfahrt. Außerdem muss auch die Verfügbarkeit der absoluten und relativen Messsysteme berücksichtigt werden. Zu Beginn des Manövers steht im Vorhafen der Schleuse ein größerer Raum zur Verfügung als zu dem Zeitpunkt des Manövers, wenn das Schiff sich vollständig in der Schleusenkammer befindet. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Verfügbarkeit der Satellitennavigation außerhalb der Schleusenkammer höher ist als innerhalb der Schleusenkammer, und umgekehrt die Nahbereichssensorik aufgrund ihrer beschränkten Reichweite erst in unmittelbarer Nähe zu den Schleusenbauwerken verfügbar ist.

Das Gesamtsystem für das Assistenzsystem zur Schleuseneinfahrt wurde anhand des räumlichen Aufbaus strukturiert. Dabei ergab sich eine Aufteilung in das Landsegment, das Übertragungssegment und das Bordsegment, siehe Abbildung 2.

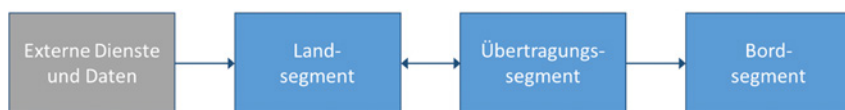


Abb. 2 Gesamtsystem

Das Landsegment umfasst die landseitige AIS- und VDES-Infrastruktur sowie die Systeme, die die Schleusendaten erfassen, siehe Abbildung 3. Das Übertragungssegment sorgt für die Übertragung der PPP-Korrekturdaten und der Schleusendaten vom Land auf das Schiff.

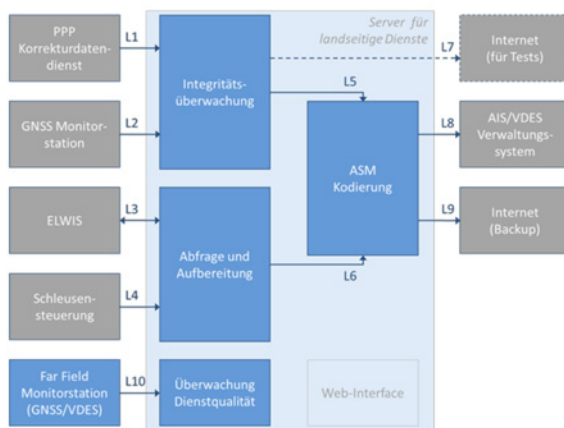


Abb. 3 Landsegment

Das Bordsegment, siehe Abbildung 4, besteht aus dem VDES-Empfänger, der die empfangenen Korrekturdaten an die GNSS-Verarbeitung weiterreicht. Die berechneten Positionsdaten werden dann zusammen mit Integritätsdaten sowohl an die nautische

Anzeige als auch die Manöverregelung weitergereicht. Gleichzeitig werden Positionsmessungen der Nahbereichssensorik ebenfalls an die nautische Anzeige und die Manöverregelung gesendet. Mit Hilfe der absoluten GNSS-Positionsdaten und der relativen Messungen der Nahbereichssensorik wird eine Position relativ zur Schleusenkammer berechnet und daraus entsprechende Steuerbefehle abgeleitet. Diese werden dann entweder über eine digitale oder analoge Schnittstelle an die Aktuatoren weitergeleitet.

In einem nächsten Schritt wurden die Schnittstellen für die Kommunikation zwischen den Komponenten des Bordsegments definiert. Dabei wurden soweit möglich Standarddatenformate aus dem NMEA 0183-Standard verwendet und bei Bedarf neue Nachrichtentypen festgelegt. Als physikalisches Übertragungsmedium für die Daten wurde aufgrund der einfacheren Verkabelung und der höheren Datenraten Ethernet gewählt.

Es waren vor allem die Schnittstellen der Regelung zur GNSS-Verarbeitung (S0), zur nautischen Anzeige (S2) und zur Auswertung der Nahbereichssensorik (S4) zu definieren. Die Schnittstellen S11 bis S15 zu den Aktuatoren sind abhängig von dem Schiff, auf dem das System installiert wird, und müssen jeweils individuell angepasst werden.

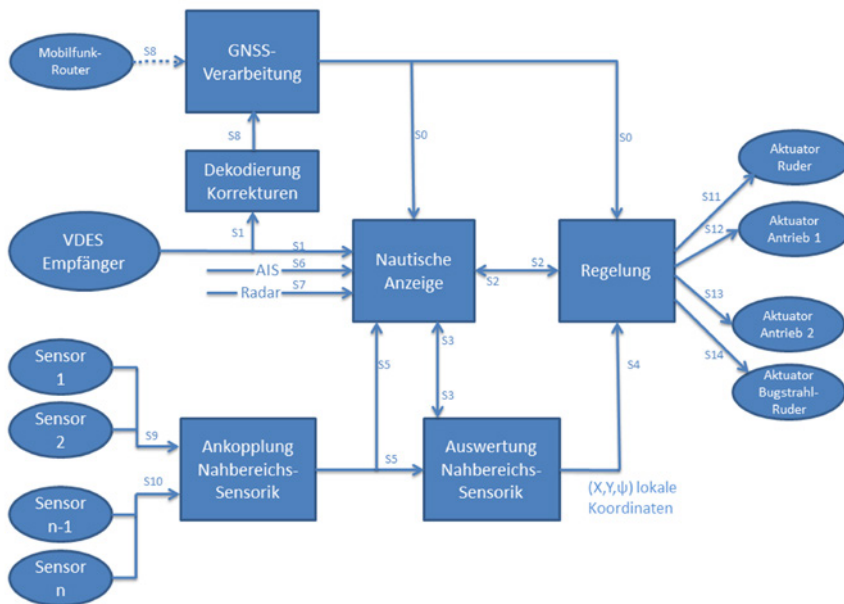


Abb. 4 Bordsegment

Die Anforderungen der Regelung an die Genauigkeit der Positions- und Lageerfassung unterscheiden sich in den verschiedenen Phasen einer automatisierten Schleusenfahrt, siehe Tabelle 1.

Begriffsdefinition Genauigkeit: Genauigkeitsanforderungen werden im Folgenden als ein statistischer Wert spezifiziert, der sich aus der statistischen Verteilung des gemessenen vom wahren Wert ergibt. Die Genauigkeitsangabe spezifiziert, dass 95 % (2σ) der Messwerte im Vertrauensbereichs (wahrer Wert $\pm 2\sigma$) liegen sollen.

Tabelle 1 Anforderung an die Positionierung

Phase	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Positionsgenauigkeit Bug quer GNSS [cm]	10	-	-	10	10
Positionsgenauigkeit Heck quer GNSS [cm]	10	10	-	-	10
Positionsgenauigkeit längs GNSS [cm]	10	10	10	10	10
Resultierende Richtungsgenauigkeit [$^{\circ}$ /m]	11,45	11,45	-	-	11,45
Längsgeschwindigkeit GNSS [cm/s]	10	10	-	-	10
Quergeschwindigkeit GNSS [cm/s]	1	1	-	-	1
Positionsgenauigkeit Bug quer NBS [cm]	-	1	1	1	-
Positionsgenauigkeit Bug längs NBS [cm]	-	-	10	-	-
Positionsgenauigkeit Heck NBS [cm]	-	-	1	1	-
Result. Richtungsgenauigkeit [$^{\circ}$ /m]	-	-	0,573	0,573	-
Längsgeschwindigkeit NBS [cm/s]	-	-	1	-	-
Quergeschwindigkeit NBS [cm/s]	-	1	1	1	-
Drehgeschwindigkeit [Grad/min] Standard Wendeanzeiger	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Die technischen Anforderungen an das Regelungssystem werden definiert durch zulässige Abweichungen von den gewünschten Sollwerten. Die zulässigen Abweichungen der Regelung sind Maximalwerte, die zur Durchführung des automatisierten Manövers unter keinen Umständen überschritten werden dürfen. Dabei muss zwischen Positions- und Winkelabweichungen unterschieden werden.

Die gesamte Abweichung der Position setzt sich zusammen aus den Fehlern der Messung der Position und der Abweichung der Regelung vom Sollwert. Eine zusätzliche Abweichung ergibt sich durch Fehler in der Messung und Regelung des Winkels.

Die zulässigen Abweichungen des Reglers wurden so festgelegt, dass im schlimmsten Fall mit maximalem Messfehler und maximalen Regelfehlern in Position und Winkel keine Berührung der Schleusenwand auftritt, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2 Anforderung an die Regelgüte

Zulässige Reglerabweichung	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
Längsposition y [cm]	Nicht relevant	Nicht relevant	100	Nicht relevant	200
Querposition x [cm]	50	10 (Bug) 20 (Heck)	10	20 (Bug) 10 (Heck)	50
Richtung [°]	23/L	11,45/L	5,73/L	11,45/L	23/L
° bei L = 100m	0,23	0,11	0,05	0,11	0,23
cm bei L = 100m	40	20	10	20	40
Drehgeschwindigkeit [°/min]	2	2	2	2	2
Geschwindigkeit [cm/s]	10	10	10	10	10

3. ENTWICKLUNGSARBEITEN

In den folgenden Abschnitten werden die Entwicklungen und Ergebnisse unterteilt nach obiger Strukturierung in Landsegment, Übertragungssegment und Bordsegment dargestellt.

3.1. LANDSEGMENT

Um hohe Genauigkeiten der Positionierung mittels GNSS erreichen zu können, müssen Erweiterungsverfahren verwendet werden. Dazu zählen Verfahren wie die Präzise-Punkt-Positionierung (PPP), die Echtzeitkinematik (RTK) oder –in neuester Zeit– auch die Hybridisation der beiden Letztgenannten, das PPP-RTK. Mit diesen Technologien können Genauigkeiten im dm- bis cm-Bereich erreicht werden.

Echtzeitkinematik (RTK)

Gegenwärtig ist RTK der Standard für hochgenaue Positionierung. RTK findet vor allem in der Landwirtschaft und der Vermessung Anwendung. Es basiert auf der Verwendung von Trägerphasenmessungen auf der zu positionierenden Station (Rover) und den ausgesendeten Daten einer Basisstation. Hierbei ist die Position der Basis bekannt. Beim Rover handelt es sich zumeist um einen GNSS-Empfänger, der sich in Bewegung befindet. Die benötigte Bandbreite für RTK-Korrekturdaten beträgt 3-6 kbit/s. RTK wird normalerweise im Unicast betrieben. Dabei benötigt jeder Anwender einen spezifischen Datenstrom.

Präzise Punktpositionierung (PPP)

Bei PPP handelt es sich um eine GNSS-Erweiterungstechnologie, bei der die auftretenden Fehler einzeln modelliert werden, und nach Anbringung der sich daraus ergebenden Korrekturen eine hochgenaue Positionierung eines einzelnen GNSS-Empfängers ermöglicht wird. Dieser Ansatz wird als Zustandsraumdarstellung (SSR) bezeichnet. Die PPP-Lösungen beruhen auf GNSS-Satellitenuhr- und Orbitkorrekturen, die aus einem globalen Netz von Referenzstationen generiert werden. Diese Korrekturen werden per geostationärem Satelliten oder über terrestrische Kommunikationsmedien zum Nutzer übertragen. Das Verfahren ist im Gegensatz zu RTK broadcastfähig, benötigt also nur eine unidirektionale Datenverbindung. Mittels PPP kann eine dm-genaue Echtzeitpositionierung erreicht werden, die ohne lokale Infrastruktur auskommt. Jedoch ist dabei eine Konvergenzzeit von 20–30 min zur Bestimmung lokaler systematischer Fehler, die durch Atmosphäre, Mehrwegeeffekte und Satellitengeometrie hervorgerufen werden, erforderlich. Auch nach einer Signalunterbrechung (z. B. bei Brückendurchfahrten) kann wieder die gleiche Konvergenzzeit benötigt werden, um die genannten Genauigkeiten zu erreichen.

PPP-RTK

Um die Vorteile von PPP mit den Vorteilen von RTK zu kombinieren, wurde das PPP-RTK-Verfahren entwickelt. Bei diesem Verfahren wird der PPP-Ansatz erweitert. Es werden aus einem regional verdichteten Netz von Referenzstationen zusätzlich atmosphärische Korrekturen bestimmt. Damit ist eine unmittelbare Lösung der Mehrdeutigkeiten für Nutzer innerhalb des verdichteten Referenzstationsnetzes möglich. Die atmosphärischen Korrekturen werden in einem Gitter bestimmt, wobei die Genauigkeit der Korrekturen an den Standorten der Referenzstationen am größten ist. Je größer die Distanz des Rovers zur nächstgelegenen Referenzstation ist, desto größer ist die Konvergenzzeit. Das benötigte Datenvolumen ist deutlich geringer als bei RTK, da die einzelnen Fehleranteile nur entsprechend ihrer zeitlichen Charakteristik übertragen werden müssen. Sich schnell ändernde Fehler oder Fehleranteile werden häufiger übertragen als sich langsam ändernde. Die benötigte Bandbreite für PPP-Korrekturen beträgt weniger als 1 kbit/s. PPP-RTK kann im Broadcast betrieben werden. Es genügt also ein Datenstrom für viele Anwender. Diese beiden Vorteile ermöglichen den Betrieb eines Korrekturdatendienstes für hochgenaues GNSS mit Hilfe der Erweiterung der bestehenden AIS-Infrastruktur um VDES. Aus diesem Grund wurde in diesem Projekt PPP-RTK eingesetzt.

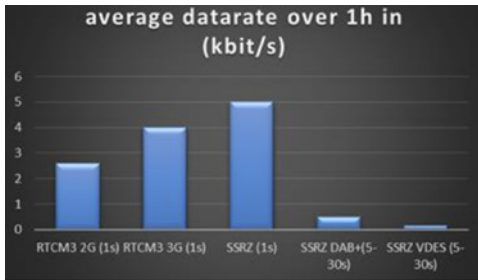


Abb. 5 Bandbreitenvergleich verschiedener Korrekturdatendienste

Integritätsmonitoring

Der im Projekt verwendete PPP-RTK-Datenstrom wird vor der Aussendung einer Prüfung unterzogen, d.h. die Wirkung der Korrekturdaten wird vorab mit einer unabhängigen Monitorstation getestet (Pre-Broadcast Monitoring). Diese Prüfung kann entweder mit einem externen RTK-Algorithmus, der die Rohdaten des Monitoringempfängers nutzt, oder mit der RTK-Engine des GNSS-Monitoringempfängers erfolgen. In beiden Fällen werden die Beobachtungsdaten der jeweiligen Monitorstation gemeinsam mit dem PPP-RTK-Datenstrom genutzt, um eine RTK-Position zu berechnen. Anschließend erfolgt eine Beurteilung der Qualität der Positionslösung, d.h. die Integrität der Lösung wird beurteilt. Diese Überwachung basiert auf definierten Schwellwerten und wird zur Markierung (OK, Warnung, Alarm) der Korrekturdatensätze genutzt.

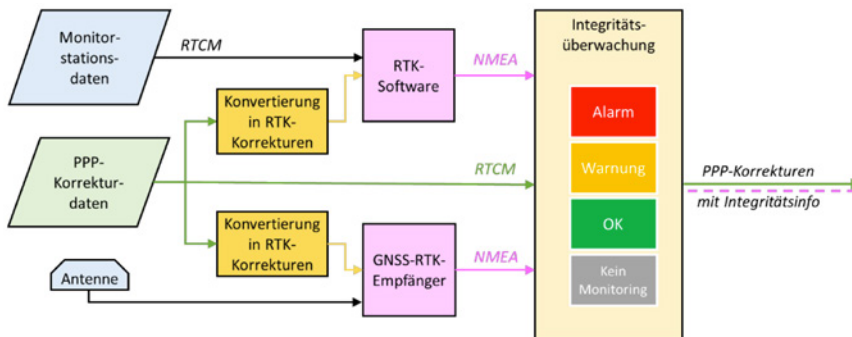


Abb. 6 Integritätsmonitoring

Überwachung der ausgesendeten VDES-Korrekturen im Servicegebiet

Beim Far Field Monitoring (FFM) wird eine permanent messende Station im Servicegebiet eines VDES-Senders betrieben. Die FFM-Station überprüft und überwacht die ausgesendeten VDES-Daten. Die Station muss neben dem VDES-Empfänger noch mit einem RTK-fähigen GNSS-Empfänger ausgestattet sein. Innerhalb der FFM-Station wird der per VDES empfangenen PPP-RTK-Datenstrom verwendet, um damit eine RTK-Position zu berechnen.

Insgesamt lassen sich somit die Qualität der Positionierung, der Qualitätsindex, die Satellitenanzahl, das Datenalter und der Empfang des ausgesendeten VDES-Signals überprüfen. Diese

Ergebnisse werden über Internet zum Server des landseitigen Dienstes zurück geliefert, so dass die Qualität des Dienstes ständig punktuell für den Service-Anbieter überprüfbar ist.

3.2. ÜBERTRAGUNGSSEGMENT

Die landseitige Übertragung der Korrekturdaten über VDE kann im Unicast- oder im Broadcastverfahren durchgeführt werden. Im Projekt wurde das Broadcastverfahren verwendet. Die VDE-Sendeeinheit an Land ist eingeschränkt durch die kollokierte AIS-Empfangeinheit. Die AIS-Empfangeinheit hat im VDES-Standard eine höhere Priorität als die VDE-Sendeeinheit. Daher ist die effektive Datenrate signifikant reduziert, insbesondere in Umgebungen mit vielen Schiffsbewegungen und somit einem hohen AIS-Datenverkehr. Um eine gleichzeitige VDE-Übertragung und einen AIS-Empfang sicherzustellen, wurde eine Interference Cancellation-Schaltung entworfen, um den Effekt der VDE-Übertragung auf den AIS-Empfang zu mitigieren. Das Prinzip ist in Abbildung 6 dargestellt.

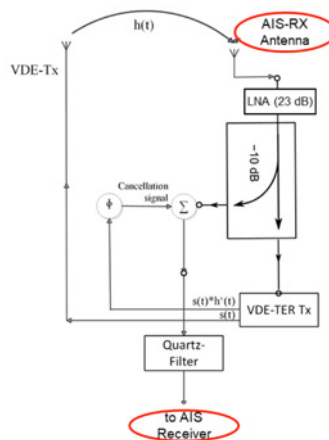


Abb. 7 Interference Cancellation

3.3. BORDSEGMENT

PPP-RTK-Prozessierung

Zur Bestimmung der Position und Geschwindigkeit wurde ein eigenes PPP-RTK-Verfahren entwickelt, welches die Echtzeit-SSR-Korrekturen benutzt. Die Korrekturen wurden in einer eigens entwickelten Klasse verwaltet, auf welcher der Positionslöser zugreifen konnte. Diese Klasse überprüfte die Konsistenz, d.h. das Vorhandensein von Broadcastephemeriden zu den Satellitenkorrekturen sowie Alter der Korrekturen als auch Vollständigkeit. Insbesondere konnten ältere Korrekturen angefordert werden, wenn mehr Daten für die Satelliten der aktuellen Epoche vorhanden waren. Die Klasse war frei konfigurierbar und konnte somit mit verschiedenen Datenströmen und unterschiedlichen Sendestrategien umgehen.

Bei der Anwendung der Ionosphären- und Troposphärenkorrekturen musste beachtet werden, dass die Werte nur für die Stationen des Referenznetzwerkes gegeben waren.

Um die Korrekturen auf die aktuelle Position des Schiffes anzuwenden, wurde das Referenznetzwerk trianguliert.

Es wurden sowohl Code- als auch Phasenbeobachtungen der GNSS-Satelliten (hier: GPS und Galileo) von jeweils zwei verschiedenen Frequenzen verwendet, also insgesamt vier Beobachtungen pro Satelliten und entsprechend der Korrekturen angepasst.

Danach folgte die Prädiktion im Kalman Filter. Hierzu wurde eine SPP-Lösung anhand der Codebeobachtungen für die Position benutzt. In der Entwicklung des Algorithmus hat sich gezeigt, dass es von Vorteil ist, die Ionosphären- und Troposphärenverzögerung mitzuschätzen, um mögliche Abweichungen in der Berechnung im Referenzstationsnetzwerk auszugleichen.

Zur ganzzahligen Bestimmung der Mehrdeutigkeiten wurden die Phasenbeobachtungen verschiedener Satelliten von einem fixierten Satelliten, dem Pivotsatelliten, subtrahiert. Dadurch wurde der Empfängersignalbias eliminiert, welcher für die Satelliten eines GNSS identisch ist. Zusätzlich wurden dann auch diese Differenzbeobachtungen zwischen den beiden Frequenzen voneinander abgezogen, um den Einfluss der Ionosphäre zu minimieren. Die entstanden Mehrdeutigkeiten aus den Doppeldifferenzen sind im Prinzip ganzzahlig und wurden dann mit dem MLAMBDA-Algorithmus bestimmt.

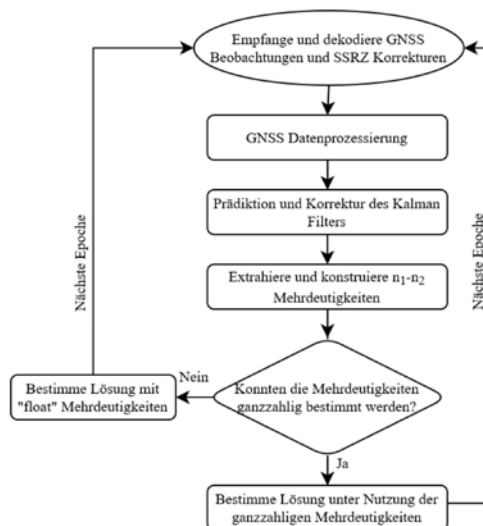


Abb. 8 PPP-RTK-Prozessierung

Nahbereichssensorik

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Argonav GmbH (vorher Innovative Navigation GmbH) wurde ein Konzept zur Verwendung von LiDAR-Sensoren (Laserscannern) erarbeitet, das einerseits eine genaue Erfassung der Abstände des Schiffsrumpfes von den Schleusenwänden nach links und rechts ermöglicht, andererseits aber auch frühzeitig den Längsabstand zum vorderen Schleusentor messen kann.

Dazu wurden Sensoren mit unterschiedlichen Eigenschaften kombiniert, um die Anforderungen an die Genauigkeit und Reichweite erfüllen zu können. Für die Erfassung des Schleusentores wurde ein Gerät mit großer Reichweite und vielen vertikalen Erfassungsebenen gewählt, um auch auf größere Entfernung das Schleusentor und die Schleusenwände erkennen zu können. Der Sensor wurde so positioniert, dass die oberste Ebene horizontal ausgerichtet war und die weiteren Ebenen nach unten gerichtet waren. Die untenstehende Abbildung zeigt ein Bild dieses Gerätes bei der Anfahrt auf eine Schleuse, wobei sich das Schiff noch außerhalb der Schleuse befindet.

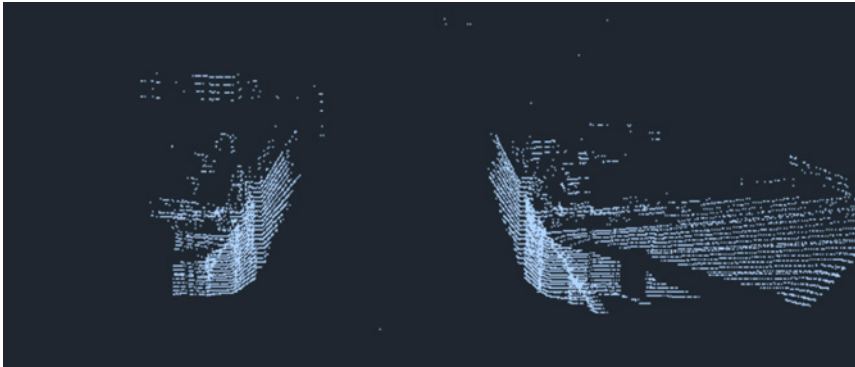


Abb. 9 LiDAR-Bild einer Schleuseneinfahrt

Um den Abstand des Schiffsrumpfes zu den Schleusenwänden links und rechts sehr genau bestimmen zu können, wurde ein weiterer Sensor mit einem horizontalen Öffnungswinkel von 270° vorgesehen. Dadurch kann der Abstand auch direkt neben dem Schiffsrumpf bestimmt werden. Zusätzlich wurde am Heck des Schiffes ein dritter Sensor vorgesehen, um auch bei der Ausfahrt aus der Schleuse Abstandsinformationen zur Verfügung zu haben, wenn der Bug die Schleusenkammer schon verlassen hat. Außerdem kann über die Fusion der Abstandsinformation von Bug und Heck der Winkel zwischen Schiff und Schleusenkammer sehr genau bestimmt werden.

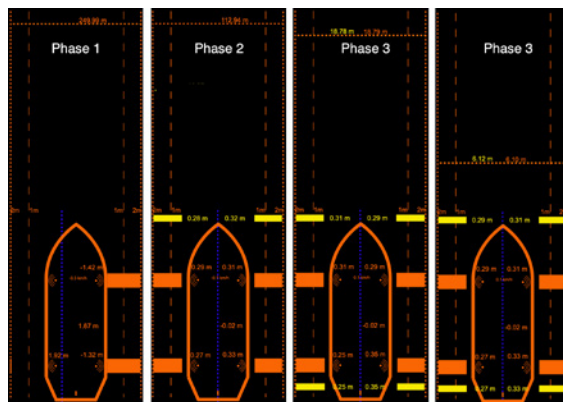


Abb. 10 Anzeige der Nahbereichssensorik für den Schiffsführer

Anzeige der Nahbereichssensorik

In Phase 1 erfolgt die Navigation nur mit Hilfe der GNSS-Daten, das Schiff wird vom Manöverregler noch auf die Schleusenmitte ausgerichtet, es befindet sich noch 1,67 m rechts von der Schleusenmitte (blaue Linie). Zusätzlich wird oben im Bild der Abstand zum vorderen Schleusentor angezeigt, der mit Hilfe der GNSS-Position und der bekannten Position des Schleusenbeckens berechnet wird (Zahlenwert orange).

In Phase 2 erfolgt die genaue Ausrichtung auf die Schleusenmitte. Im dargestellten Fall wurde für den Schwerpunkt eine Abweichung von 0,02 m erreicht. Zusätzlich erscheint bereits die Darstellung der Messwerte vom vorderen Nahbereichssensor (gelbe Balken), da sich der Bug bereits nah genug an den Schleusenbauwerken befindet. Ab diesem Moment werden die Daten der Satellitennavigation mit den Daten der Nahbereichssensoren fusioniert, solange die GNSS-Daten mit ausreichender Genauigkeit vorliegen. Falls die Daten einer Antenne ausfallen, wird mit den Daten der zweiten Antenne sowie mit den Daten der Nahbereichssensoren weiter die Position berechnet.

In Phase 3 befindet sich das ganze Schiff in der Schleuse und die Nahbereichssensoren am Heck liefern ebenfalls Daten (gelbe Balken unten). Außerdem erfasst nun auch der Nahbereichssensor mit der hohen Reichweite am Bug das Schleusentor und liefert einen Wert von 18,78 m (Zahlenwert gelb). Unterhalb einer bestimmten Entfernung zum Schleusentor beginnt die orangefarbene Linie, sich in Richtung Schiff zu bewegen, um die abnehmende Entfernung zu verdeutlichen.

Mit Hilfe dieser grafischen Darstellung ist der Schiffsführer in der Lage, die Position und Ausrichtung des Schiffes außerhalb und innerhalb der Schleuse auf einen Blick zu erfassen. Für genauere Informationen stehen die Zahlenwerte zur Verfügung.

MANÖVERREGELUNG

Das Assistenzsystem zur automatisierten Schleusenfahrt sollte grundsätzlich so modular aufgebaut werden, dass einzelne Komponenten einfach getauscht werden können und somit verschiedene Lösungen für die einzelnen Funktionsblöcke getestet werden können. Es erfolgte deshalb softwaretechnisch eine Aufteilung in ein Beobachter-Modul, ein Regler-Modul, in dem die Planung und Vorsteuerung enthalten sind, sowie einem Modul zur Schuballokation. Das Auslesen der Messwerte von GNSS, Nahbereichssensorik und Drehrate erfolgt wiederum durch eigene Softwaremodule. Abbildung 11 zeigt den modularen Aufbau der Software des Assistenzsystems.

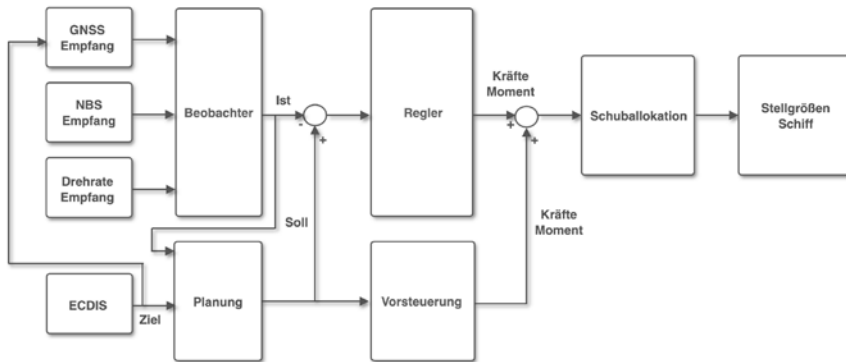


Abb. 11 Modularer Aufbau der Manöverregelung

Die Auswahl der Schleusenkammer erfolgt über das ECDIS-System, als Ergebnis wird der Referenzpunkt des Schleusenkoordinatensystems, die Ausrichtung des Schleusenkoordinatensystems und die Parkposition und -lage sowohl an das Modul zur Planung des Manövers als auch an das Modul zum Empfang der GNSS-Daten weitergeleitet. Im Modul zum Empfang der GNSS-Daten wird der Referenzpunkt benötigt, um die absoluten Positionsdaten des Satellitennavigationssystems in das lokale Schleusenkoordinatensystem umzurechnen. Das Modul zur Planung des Manövers berechnet von der aktuellen Position eine fahrbare Bahn zur Zielposition und liefert alle Sollzustände für den Regler. Die modellbasierte Vorsteuerung berechnet aufgrund der aus der Sollbahn resultierenden Sollgeschwindigkeit und -beschleunigung die notwendigen Kräfte und das notwendige Moment. Der Regler gleicht die durch Modellfehler und Störungen erzeugten Abweichungen aus. Die für das jeweilige Schiff angepasste Schuballokation berechnet aus den notwendigen Kräften und dem notwendigen Moment die Ansteuerung für die einzelnen Antriebe in Form von Ruderwinkeln und Drehzahlvorgaben.

4. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE UND DEMONSTRATION

4.1. SIMULATION

Modellierung des Fahrtreviers

Die meisten Testfahrten wurden an der Schleuse in Koblenz durchgeführt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projekts der Raum Koblenz als Fahrtrevier im Schiffsführungssimulator der Bundesanstalt für Wasserbau modelliert. Dazu wurden verschiedene Quellen verwendet:

- › Inland ENC (Electronic Nautical Charts) für Fahrrinnengrenzen, Schifffahrtszeichen, Hektometermarken etc.
- › Wasserbauwerksdaten: Fotos, Bauwerkspläne

- › Bauwerksdaten an Land: Fotos, CityGML-Datensatz des Landesvermessungsamts, OpenStreetMap-Karten
- › Wasserbauliche Daten: Höhenwerte, Sohlhöhen, Wasserspiegellagen, Strömungsgeschwindigkeiten

Wenn alle Daten integriert sind, muss das Fahrtgebiet für das Sichtsystem kompiliert und auf alle Sichtsystemrechner verteilt werden. Einen Eindruck von einem fertig kompilierten Modell vermittelt Abbildung 12.



Abb. 12 Fahrtrevier Schleuse Koblenz im Schiffsführungssimulator der BAW

Modellierung von Schiffen

Für das Projekt SciPPPer wurden Messfahrten mit der MS Bingen des WSA Rhein durchgeführt. Aus diesem Grund sollte das Schiff auch am Schiffsführungssimulator eingesetzt werden können. Das 3D-Modell wird zunächst auf Basis von Bauplänen und Fotos hergestellt.

Im nächsten Schritt müssen alle beweglichen Bauteile, Lichter und Signale animiert und dem Steuerungsinterface des Simulators zugänglich gemacht werden. Abbildung 13 zeigt die MS Bingen nach erfolgter Animation.

In den folgenden Arbeitsschritten werden die Spezifikationen aller Ausrüstungsgegenstände eingetragen. Als winzig kleiner Auszug sollen hier die wichtigsten Punkte dienen:

- › Die Motorkurve wird in Bezug auf Drehzahl und Drehmoment den Stufen des Engine Order Telegraph (EOT) zugeordnet.
- › Die EOT-Stufen und die zugehörigen Motordrehzahlen müssen auf einer Messfahrt aufgezeichnet worden sein um diese Zuordnung durchführen zu können.

- › Windangriffsflächen sind bei Binnenschiffen üblicherweise nicht klein und müssen berücksichtigt werden. Hierzu kann man Vergleichswerte für Kraft- und Drehmomentkoeffizienten aus der Literatur heranziehen.
- › Drehmoment, Schub und Drehzahl des Propellers beruhen auf Koeffizienten der Wageningen B-serie, können aber für spezielle Propeller auch vollständig neu definiert werden. Als Basis dafür werden die Kurven eines Propellerdiagramms als neues Propeller-Objekt angelegt.
- › Die hydrodynamischen Koeffizienten des Schiffes müssen so eingestellt werden, dass simulierte Manöver den Manövern aus der Messfahrt entsprechen.

Die Bestimmung der korrekten hydrodynamischen Koeffizienten ist ein iterativer Prozess, der für jeden Tiefgang, auf den das Schiff eingestellt werden soll, wiederholt werden muss. Auf Messfahrten können aufgrund des hohen Aufwands nur wenige, etwa 1-2 Tiefgänge mit dem Schiff gefahren werden.

Zu jedem Tiefgang gehört auch ein entsprechender Lastfall, für den wiederum eine Stabilitätskurve im Schiffshandbuch zu finden sein sollte. Bei bekannter Lage des Massenschwerpunkts lässt sich aus diesen Kurven die metazentrische Höhe in Längs- und Querrichtung bestimmen. Diese werden im physikalischen Modell.

Sobald ein Schiff mit einer ausreichenden Genauigkeit modelliert wurde, wird es am Schiffsführungssimulator von seinem tatsächlichen Schiffsführer in einer Validierungsfahrt abgenommen.



Abb. 13 3D-Modell des Mehrzweckschiffes MS Bingen

ERGEBNISSE VON SCHLEUSENFahrTEN AM SIMULATOR, MANUELL UND AUTOMATISCH

Um das Regelungssystem zur automatischen Schleusenfahrt gefahrlos testen zu können, wurde es auf dem Schiffsführungssimulator ähnlich wie auf einem Großschiff installiert und in Betrieb genommen. Anschließend wurde es von diversen Schiffsführern erprobt. Die Schwierigkeit der nautischen Aufgabe einer Schleuseneinfahrt wurde von den Schiffsführenden zunächst ohne das Assistenzsystem eingeschätzt; anschließend wurde die Fahrt unter Einsatz des Assistenzsystems wiederholt. Die Bewertung erfolgte auf einer Skala von -3 = sehr schwer bis +3 = sehr leicht. Anschließend wurde der Mittelwert aus allen durchgeführten Fahrten genommen.

Im Fahrtrevier Koblenz wurde die Bergfahrt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten bei sonnigem Wetter (Zeile 1 in Abbildung 14) als relativ leicht (+1) bewertet. Das Assistenzsystem erleichtert die Einfahrt in die Schleuse nur wenig (+2), so dass sich für diese Variante eine Verbesserung durch den Bahnregler um +1 ergibt.

Im Fahrtrevier Koblenz wurde anschließend die Bergfahrt bei unsichtigem und windigem Wetter (Zeile 2 in Abbildung 14) durchgeführt. Trotz der geringen Strömungsgeschwindigkeit wurde die Schleuseneinfahrt als sehr schwierig wahrgenommen (-2). Mit dem Assistenzsystem wurde die Aufgabe weder als schwierig noch als leicht empfunden. Sodass sich insgesamt eine Verbesserung durch das Assistenzsystem um +2 ergibt.

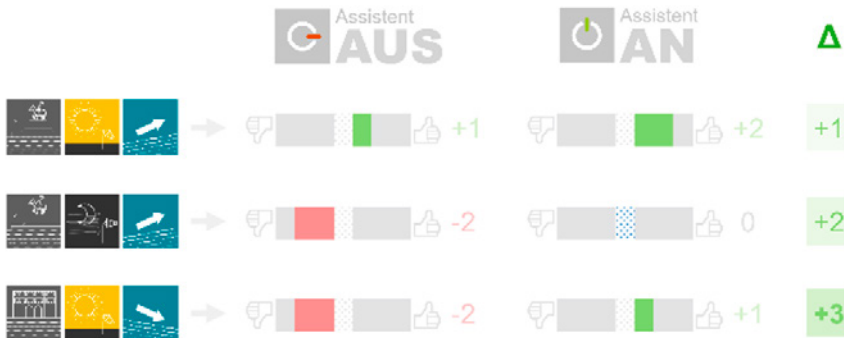


Abb. 14 Bewertung der Schwierigkeit der nautischen Aufgabe

4.2. MESSFAHRTEN

Bei zahlreichen Messfahrten auf den Mehrzweckschiffen MS Bingen im Raum Koblenz sowie der MS Naab am Main-Donau-Kanal wurden unterschiedliche Ausbaustufen der einzelnen Komponenten intensiv getestet. Es erfolgten sowohl dedizierte Einzeltests für VDES-Übertragungen, Nahbereichssensorik, GNSS-Abdeckung als auch Integrations-tests, bei denen das Zusammenspiel der verschiedenen Module erprobt werden konnte. Die flexiblen Einsatzzeiten und Verfügbarkeiten der Mehrzweckschiffe der WSV erwiesen sich für diesen Zweck als ausgesprochen gut geeignet. Die Montage der Sensorik und Funkausrüstung über speziell angefertigte Halterungen war durch die Unterstützung

von Seiten der Wasser- und Schifffahrtsämter problemlos möglich. Die Erprobung des Gesamtsystems aus Sensorik und Regelungssystem konnte im Rahmen der Abschlussdemonstration in Strasbourg erfolgen.

4.3. ABSCHLUSSDEMONSTRATION

Die Abschlussdemonstration fand an der Nordschleuse in Strasbourg am 23.02.2022 statt. Zum Einsatz kam das Kabinenschiff Victor Hugo der französischen Reederei Croisieurope, das für die Demonstrationsfahrt mit zusätzlicher Ausrüstung für die automatische Schleusenfahrt ausgestattet wurde. Abbildung 16 zeigt die Victor Hugo vor der Einfahrt in die Nordschleuse.



Abb. 16 Luftbild der Schleuseneinfahrt in die Nordschleuse Strasbourg

Zwei geodätische Antennen wurden an Bug und Heck montiert, wobei zusätzlich unter der Bugantenne eine IMU (Inertial Measurement Unit) angebaut wurde. Die PNT-Unit (Position, Navigation, and Timing) zur Datenverarbeitung und Echtzeitpositionierung befand sich im Fahrerhaus. Im Laufe der Kampagne stellte sich heraus, dass die Drehratenmessungen der IMU gestört wurden, wenn gleichzeitig das Fahrassistenzsystem per Bugstrahlruder stark geregelt hatte. Grund war die ungünstige Positionierung der Bugantenne oberhalb des Ruders. Die Echtzeitprozessierung wurde dementsprechend angepasst, so dass die IMU-Messungen in diesen Phasen verworfen wurden.

Ferner wurden drei LiDAR-Sensoren auf Victor Hugo installiert, zwei Sensoren am Bug sowie ein weiterer am Heck der Victor Hugo. Ein LiDAR-Sensor am Bug hatte die Aufgabe, das Schleusentor möglichst frühzeitig erkennen zu können, während der andere die Schleusenwände erfassen musste. Der Sensor am Heck war für die Schleusenwanderfassung nach Einfahrt und bei der Ausfahrt zuständig. Siehe dazu Abbildung 15.

Durch vorherige Definition einer digitalen Schnittstelle auf Ethernet-Basis zwischen dem Regelungssystem und dem Antriebssystem der Victor Hugo war keine weitere Hardware

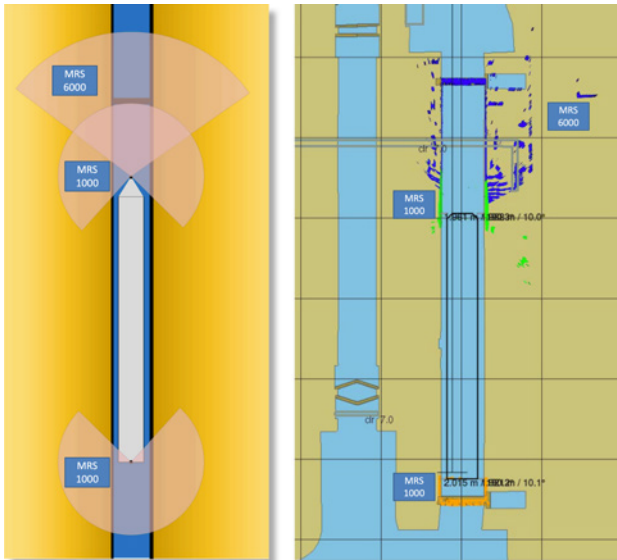


Abb. 15 Anordnung der LiDAR-Sensoren auf Victor Hugo und Anzeige

für die Ansteuerung der Aktoren notwendig. Ein Netzkabel zwischen Regelungs- hardware und Antriebssteuerung genügt.

Bei mehreren Fahrten wurde das Gesamtsystem aus Sensorik, Aktorik und Regelung- technik intensiv getestet. Die vollautomatische Fahrt wurde vom zuständigen Schiffsführer überwacht. Ein manueller Eingriff war bei keiner der insgesamt drei Schleuseneinfahrten notwendig.

Tabelle 3 Regelgüte bei Einfahrt in Nordschleuse Strasbourg

zulässige Reglerabweichung	Anforderung Phase 3	Demonstration, mit Nullpunktkompensation
Längsposition y [cm]	100	<250
Drehgeschwindigkeit [$^{\circ}$ /min]	2	2,23
Richtung [$^{\circ}$]	5,73/L	0,11
$^{\circ}$ bei $L = 85\text{m}$	0,06	16
cm bei $L = 85\text{m}$	10	
Querposition x [cm]	10	<10
Geschwindigkeit [cm/s]	10	

Es zeigte sich, dass die Anforderung für die Längsposition bei der Demonstration nicht eingehalten wurde. Dazu ist anzumerken, dass in den Einstellungen des Reglers Abweichungen in der Längsposition nicht sehr stark gewichtet wurden, da die Schleuse wesentlich länger war als das Schiff. Durch eine Optimierung der Parameter ist eine Erfüllung der Anforderung zu erreichen.

Die Anforderung an die Abweichung der Drehgeschwindigkeit wurde annähernd erfüllt. Dabei wurde ein Nullpunktsfehler für die Tabelle korrigiert. Eine Ursache für die nicht ganz erreichte Anforderung ist das schaltende Verhalten des Querstrahlruders im Bug. Mit diesem Stellorgan erfüllt das Schiff nicht die gestellten Anforderungen an die Testschiffe. Mit einem kontinuierlich ansteuerbaren Querstrahlruder ist eine verbesserte Regelgüte in der Drehgeschwindigkeit zu erwarten.

Die bei der Demonstration aufgetretenen Abweichungen des Winkels wurden ebenfalls durch den Nullpunktsfehler in der Drehgeschwindigkeit und das schaltende Verhalten des Querstrahlruders verursacht. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Abweichungen durch die Kompensation des Offsets und bei Verwendung eines besser geeigneten Querstrahlruders in dem geforderten Bereich liegen.

Auch bei der Querposition lag die Abweichung leicht über dem geforderten Wert, allerdings lässt sich auch dies mit der Abweichung des Winkels erklären. Insgesamt ergibt sich für den Bug rechnerisch bei Kompensation des Nullpunktsfehlers eine maximale Abweichung von $0,16\text{ m} + 0,1\text{ m} = 0,26\text{ m}$. Damit wäre auch mit einem $11,4\text{ m}$ breiten Schiff in einer 12 m breiten Schleuse das Manöver erfolgreich gewesen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Anforderungen bei den Validierungsfahrten knapp nicht erfüllt wurden. Die Ursachen dafür sind der nicht kompensierte Nullpunktsfehler der Drehgeschwindigkeit und das schaltende Verhalten des Bugstrahlruders. Unter der Voraussetzung, dass diese Probleme beseitigt werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen durch den umgesetzten Manöverregler erfüllt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung eines Demonstrators eines Assistenzsystems für die automatisierte Schleusenfahrt wurde erfolgreich durchgeführt, die Funktionsfähigkeit des Demonstrators wurde in Versuchen mit einem Fahrgastschiff nachgewiesen. Dabei wurde die Fusion von Daten der hochgenauen Satellitennavigation mit Daten der Nahbereichssensorik genutzt, um eine präzise Schätzung der Position und Lage des Schiffes relativ zur Schleuse zu erhalten. Der modulare Aufbau der Regelungsstrategie bestehend aus den Komponenten Beobachter, Regler, Schuballokation, Manöverplanung und Vorsteuerung hat sich in der Praxis bewährt, das System ist einfach an verschiedene Schiffstypen anpassbar. Die Simulation am Schiffsführungssimulator der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe während der Entwicklung war unabdingbar und hilfreich, konnte aber nicht alle Aspekte eines realen Schiffes voll abdecken. Als sehr wertvoll erwies sich die frühzeitige Einbindung von Schiffsführern in die Entwicklung, da sie hilfreiche Rückmeldungen zu den entwickelten Strategien geben konnten.

Die Reduzierung der Bandbreite der Korrekturen auf unter 1 kbit/s wurde deutlich erreicht. Dabei konnte das im Projekt entwickelte PPP-RTK-Verfahren die SSR-Korrekturen,

insbesondere die Atmosphäreinflüsse, nutzen, um eine hohe Genauigkeit der horizontalen Position zu liefern als auch eine schnelle Konvergenz im Sekundenbereich bei Signalabbruch zu gewährleisten. Eine horizontale Genauigkeit von 10cm in 95% der Epochen konnte auf mehreren Messkampagnen nachgewiesen werden. Im Vertikalen war das nur bei einer statischen Langzeitmessung möglich. Insbesondere Brückendurchfahrten sorgten für große Ausreißer.

Insgesamt waren die berechneten Positionslösungen hinsichtlich Genauigkeit und Konvergenz vergleichbar mit den Lösungen eines RTK-Verfahrens mit dem entscheidenden Vorteil, dass deutlich weniger Bandbreite für die Korrekturdaten benötigt wurden.

Softwaremodule zur Aufbereitung der PPP-RTK-Korrekturdaten, deren Integritätsprüfung und Übertragung über das AIS/VDES-System wurden entwickelt. Eine Vorabprüfung mit dem Ziel der Bereitstellung von Integritäts-Flags wird zurzeit von keinem Dienst angeboten. Weiterhin wurde die Kodierung/Dekodierung von PPP-Daten in VDES-Nachrichten realisiert und unter anderem bei der adressierbaren VDES-Datenübertragung erprobt. Die Herstellung eines Funktionsmusters einer FFM-Station zählt auch zu den erreichten Zielen. Zur Übertragung von Schleusenbetriebszuständen über den AIS/VDES-Kanal wurde ein Datenformat (ASM) entwickelt.

Die erstmalige Übertragung integritätsgeprüfter PPP-RTK-Korrekturdaten über AIS/VDES im Binnenwasserstraßenbereich ist erfolgreich durchgeführt worden. Die experimentell demonstrierte Interference Cancellation-Schaltung zeigte, dass die AIS-Reserveantenne aktiv eingebunden werden kann, um VDE und AIS parallel zu nutzen. Das Experiment zeigte, dass mit begrenzter Sendeleistung die VDE-Sendeinheit parallel einen Empfang der AIS-Daten durch die Interference Cancellation ermöglichen konnte.

DANKSAGUNG

Vielen Dank an Croisieurope für die Bereitstellung des Kabinenschiffs Victor Hugo während der Testphase und der Abschlussdemonstration.

Die großzügige Bereitstellung der Mehrzweckschiffe MS Bingen durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Koblenz sowie MS Naab durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Regensburg ermöglichte viele Messfahrten an verschiedenen Schleusen an Mosel und am Main-Donau-Kanal. Herzlichen Dank hierfür. Hier möchten wir uns bei der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen Deutschlands (AdV) für die Bereitstellung der PPP-RTK-Korrekturdaten aus dem SAPOS-Netz bedanken.

Unser besonderer Dank geht an die Mitarbeiter am PtJ und BMWK für die Ermöglichung dieses Projekts sowie die projektbegleitende Unterstützung.

LITERATUR

- [1] Alberding, J., Uhlemann, M. & Zimmermann, J. (2022). Abschlussbericht SciPPPer der Alberding GmbH. Wildau.
- [2] Karbach, D. & Hoppe, M. (2022). Abschlussbericht SciPPPer für die GDWS. Koblenz.
- [3] Lachmeyer, A. & Lutz, A. (2022). Abschlussbericht SciPPPer der Argonics GmbH. Stuttgart.
- [4] Schröder, M., Höfler, T., Leutz, M. & Bernath, A. (2022). Abschlussbericht SciPPPer der Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe.
- [5] Ziebold, R., Lass, C., An, X., Raulefs, R. & Wirsing, M. (2022). Abschlussbericht SciPPPer des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Neustrelitz, Oberpfaffenhofen.

DIGILECK –

DIGITALE LECKSTABILITÄT

AUTOREN

DR.-ING. ADELE LÜBCKE

FSG-NOBISKRUG DESIGN GMBH

PROF. DR.-ING. STEFAN KRÜGER

TUHH, INSTITUT FÜR ENTWERFEN VON
SCHIFFEN UND SCHIFFSSICHERHEIT

DR.-ING. HENDRIK VORHÖLTER

MAREVAL AG

JONAS WEHLING, M. SC.

SAL ENGINEERING GMBH

ABSTRACT

Das Forschungsvorhaben „Digileck4.0“ nimmt Bezug auf aktuelle und zukünftige Verschärfungen des Sicherheitsniveaus der Leckrechnung, die seit 2020 in Kraft getreten sind und für die aktuellen Ablieferungen (ab etwa 2022/23) relevant sind. Dabei zielt das Vorhaben darauf ab, durch intelligentere Berechnungen versteckte Sicherheitspotenziale in den konservativen Berechnungsannahmen der Vorschriften zu beseitigen. Dazu wird der konventionelle Leckrechnungsprozess mittels digitaler Methoden neu aufgesetzt und vollständig automatisiert und die statischen Berechnungsannahmen werden durch direkte Flutungssimulationen ersetzt. Das Vorhaben setzt den neuen digitalen Prozess für den Entwurf, den Bau und auch den Betrieb der Schiffe auf, entwickelt die benötigten Berechnungsgrundlagen und die dazu notwendige IT-Infrastruktur und stellt eine prüffähige elektronische Dokumentation bereit. Mit Abschluss des Vorhabens ist es möglich, erheblich leistungsfähigere Entwürfe von Schiffen zu erstellen, die auch deutlich flexibler betrieben werden können. Die neu entwickelten Verfahren finden zudem Anwendung auf die Berechnung von Bergungsvorgängen von Schiffen.

1. EINLEITUNG

Grundsätzlich wird für die Einhaltung der Vorschriften von Schiffen die Untersuchung der Schwimmstabilität im Leckfall untersucht. Dieses Vorgehen ist in der SOLAS geregelt. Mit dem Vergleich aus dem geforderten Index R und dem erreichten Index A, zu bestimmen aus Auftretenswahrscheinlichkeit p_i und Überlebensindex s_i , wird das Sicherheitsniveau von Schiffen bewertet. Der Index A setzt sich aus dem gewichteten Mittel aus der Indexberechnung für drei verschiedene Tiefgängen zusammen. Grundsätzlich muss für den Vergleich der Indices folgender Zusammenhang gelten:

$$R \leq A \quad \text{mit } A = p_i \cdot s_i \text{ wobei}$$

$$p_i(x_1, x_2, y, z) = p_i(x_1, x_2) \cdot r_i(y, x_1, x_2) \cdot v_i(z) \text{ ist.}$$

Mit der neuen SOLAS, welche am 1. Januar 2020 in Kraft getreten ist, gelten auch neue Vorschriften in Bezug auf die einzuhaltende Leckstabilität von Schiffen. Eine der wesentlichen Änderungen beinhaltet die Erhöhung des sogenannte Required-Index R. Dieser wird um bis zu 8-10% im Vergleich zur alten Vorschrift angehoben und beschreibt vereinfacht das akzeptierte Restrisiko, dass ein Schiff nach einer Beschädigung nicht mehr ausreichend schwimmfähig bleibt. Weiterhin war dieser Index vorher von der Schiffslänge, Anzahl Personen sowie Plätzen in den Rettungsbooten abhängig, auch wenn der Einfluss der Länge nahezu vernachlässigbar war (Abb. 1). In der neuen Vorschrift ist der R-Index nur noch von der Anzahl Personen an Bord abhängig.

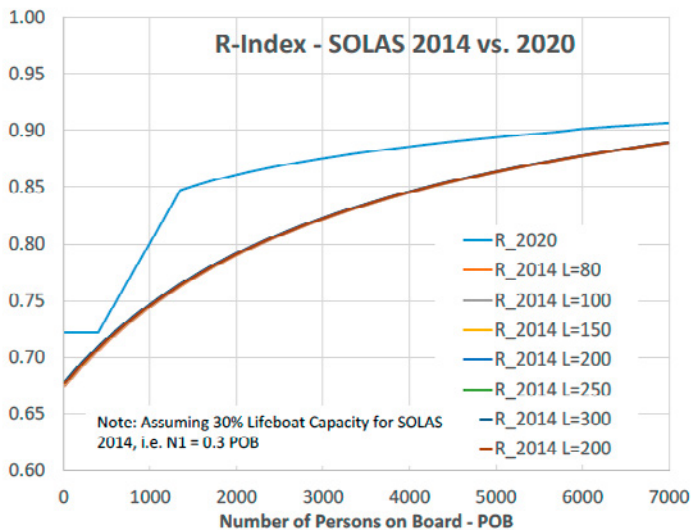


Abb. 1: Erhöhter R-Index nach SOLAS 2020

Neben den Änderungen des R-Index gibt es auch eine Anpassung des Überlebensindex (si-Wert). Dies gilt speziell für Leckfälle, bei denen RoRo-Decks mit beschädigt sind, also große offene Decks. Dieser reduziert den erreichten Index A insgesamt um ca. 2-3%. Zudem sind nun auch für Frachtschiffe Leckfälle im Detail zu betrachten, wenn bei diesen Querfluteinrichtungen involviert sind. Vorher galt dies nur für Passagierschiffe.

Diese genannten Änderungen haben einen erheblichen Einfluss auf die Einhaltung der Leckstabilitätsvorschrift für neue Schiffe ab dem 1. Januar 2020. In Abb. 2 sind beispielhaft die R-Index Werte für drei Baunummern der Flensburger Schiffbaugesellschaft jeweils nach SOLAS 2014 und 2020 gegenübergestellt.

Da diese Entwürfe bereits jetzt hocheffiziente Fähren darstellen, ist es eine erhebliche Herausforderung auch die neuen Vorschriften nach SOLAS 2020 zu erfüllen. Um also auch in Zukunft noch effiziente und technisch ausgereizte Schiffe bauen zu können, sind erhebliche Anstrengungen beim Entwurf und der Konstruktion dieser Schiffe erforderlich.

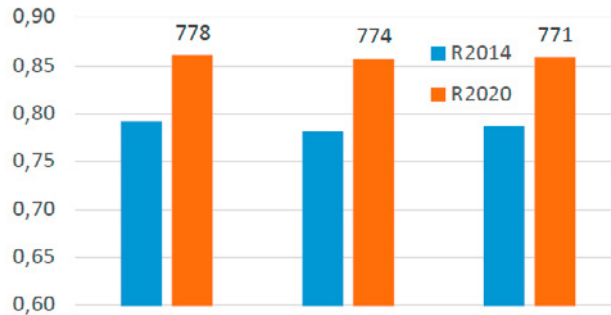


Abb. 2: R-Index nach SOLAS 2014 und 2020 für drei Baunummern der FSG

Durch die vollständige Neufassung der Leckrechnung (Prozess) auf der Grundlage digitaler Technologien (Re- Design 4.0) in den Themenblöcken Entwurf, Bau und Betrieb ist die Identifikation der zentralen Anwendungsfelder erfolgt, für die die Grundlagenentwicklungen stattfinden werden.

1. Beschädigungsgenerierung durch Monte-Carlo-Simulation:

Diese Entwicklung führt zu einer vollständigen Invertierung des Leckrechnungsprozesses. Im gegenwärtigen Prozess der kommerziellen Softwarehersteller definiert der Anwender die Beschädigungen, dann ermittelt die Software die zugehörige Trefferwahrscheinlichkeit. Im Monte-Carlo-basierten Prozess von E4/SEGIS wählt der Monte-Carlo-Automat zufällig ein Kollektiv von Beschädigungen, ermittelt dann die jeweils beschädigten Räume und berechnet dann durch Auszählen direkt die Trefferwahrscheinlichkeit.

2. Flutungssimulation im Zeitbereich:

Am meisten Potenzial wird bei der gegenwärtigen Leckrechnungsberechnung bei den Zwischenflutungszuständen verschenkt, und zwar insbesondere bei der Querflutung. Das liegt daran, dass für die Querflutung die eine Seite des Schiffes als vollständig geflutet angenommen wird, und dann wird bei der Stabilitätsberechnung gegen weichere Kriterien geprüft. Es liegt aber auf der Hand, dass es bei geringen Leckausdehnungen sofort zum Querfluten kommt und der Fall daher überlebt wird.

3. Operative Leckrechnung:

Derzeit wird mittels der Leckrechnung eine Stabilitätsgrenzkurve ermittelt, die dann Teil des Stabilitätshandbuchs an Bord wird. Das Schiff muss dann immer im Betrieb mit einer Stabilität nach Stabilitätshandbuch fahren. Dieser Prozess bildet die operativen Belange nicht ausreichend flexibel ab und verschenkt erhebliches Potenzial. Die Neuausrichtung der maritimen Industrie in Deutschland hat sich im Wesentlichen auf komplexe Spezialschiffe (Werften) sowie Offshore-Anlagen für Wind, aber auch Öl und Gas fokussiert (Ingenieurbüros und Dienstleister). Damit entfernt sich die maritime Szene in Deutschland immer weiter vom klassischen Serienschiffbau, bestehend aus schiffbaulichen Standardprodukten.

2. BERECHNUNGSMETHODIK

Ein wichtiger Bestandteil ist die Erarbeitung des Prozessablaufes für den neuen digitalen Leckrechnungsprozess, welcher unter Berücksichtigung aller schiffbaulichen Untersuchungen (Entwurf – Bau – Betrieb – Bergung) erarbeitet wurde. In Abb. 3 ist das Ergebnis dieser Diskussion dargestellt.

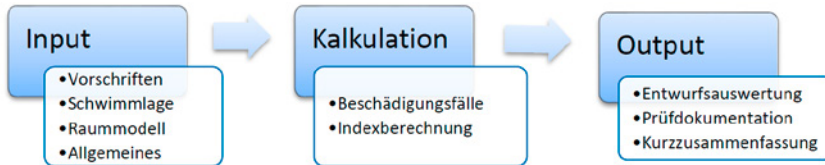


Abb. 3: Prozessablauf Leckrechnung

Die Input-Parameter sind schiffbaulicher Standard auf den im Folgenden nicht näher eingegangen wird. Der Fokus liegt in diesem Kapitel auf der Berechnungsmethodik.

2.1 Beschädigungsgenerierung

Bei der Monte-Carlo Leckrechnung müssen im Vergleich zu anderen Verfahren keine Zonen definiert werden. Denn die Beschädigungsgenerierung verläuft so, dass mit Hilfe von den in den Vorschriften hinterlegten Verteilungsfunktionen eine beliebige Anzahl (typischerweise 106) Quader generiert werden. Für jeden dieser Quader wird ermittelt, welche Kombination von Räumen getroffen wird. Die Anzahl der Treffer für jede Raumkombination wird dann gezählt und aus dem Verhältnis der Treffer zur Anzahl der Ziehungen wird dann direkt die Trefferwahrscheinlichkeit bestimmt. Das Verfahren ist extrem schnell und vollkommen zuverlässig, und der besondere Vorteil dabei ist, dass man keinerlei manuelle Eingabe durch den Nutzer benötigt. Der Nachteil der Methode liegt nun darin, dass das Verfahren zwar die gesamte Trefferwahrscheinlichkeit P_i liefert, nicht aber die Einzelwahrscheinlichkeiten p_i , r_i und v_i . Diese werden aber bei Einreichung der Prüfdokumentation benötigt. Die Lösung für die Berechnung der Einzelwahrscheinlichkeiten liegt jetzt darin, eine zweite Ziehung mit einem Leckquader durchzuführen, der gleichzeitig die maximal mögliche Eindringtiefe und die maximal mögliche Eindringhöhe hat. Denn für diesen zweiten Quader muss gelten, dass $r_i=v_i=1$ ist. Damit erhält man dann aus der Simulation direkt den Wahrscheinlichkeitsbeitrag p_i . Wenn man jetzt die entstandenen Unterfälle einer Leckgruppe mit voller Eindringtiefe nach deren Eindringhöhe sortiert, dann lässt sich unmittelbar die Wahrscheinlichkeit v_i auf direktem Wege ausrechnen, und die dann noch fehlende Wahrscheinlichkeit r_i erhält man aus dem Quotienten von P_i und p_i sowie v_i .

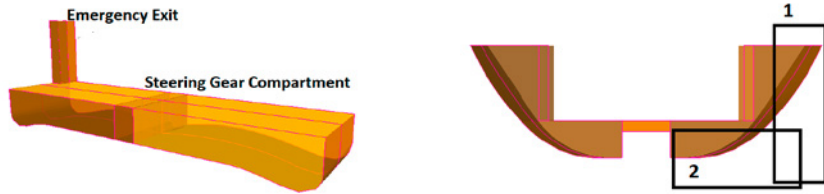


Abb. 4: Zwei Fälle für $r_i > 1$

Das Problem ist jetzt, dass die so ermittelte Wahrscheinlichkeit r_i durchaus größer sein kann als 1, was zunächst mathematisch nicht sinnvoll erscheint. Abb. 4 zeigt zwei Fälle, bei denen das Problem auftritt. Links ist der Rudermaschinenraum eines Schiffes gezeigt mit einem auf BB gelegenen Notausstieg. Der Raum allein wird nur von Lecks getroffen, die maximal bis zur Oberkante des Raumes gehen, denn sonst würde der darüber liegende Raum mitgetroffen. Lediglich wenn der Treffer in den Bereich des Notausstieges fällt, dann kann der Raum auch getroffen werden, wenn das Leck deutlich höher geht. Es werden also zwei verschiedene Trefferszenarien zusammengefasst, die aber wie ein Treffer behandelt werden. Daher mussten Möglichkeiten geschaffen werden, diese beiden Trefferszenarien zu trennen, und zwar ohne zusätzliche Eingaben des Nutzers. Eine vergleichbare Situation findet sich in Abb. 4, rechts. Der dort gezeigte Void Space kann ebenfalls durch zwei völlig verschiedene Trefferszenarien getroffen werden, die ebenfalls getrennt werden müssen.

2.2 Indexberechnung

Wenn alle Leckfälle mittels der oben beschriebenen Methode generiert worden sind, dann kann die Berechnung der Hebelarmkurven und daraus die Berechnung des jeweiligen Überlebensindex angestoßen werden. Auch diese Berechnung erfolgt automatisch ohne weitere Nutzereingaben. Während dieser Berechnungen wird dann auch automatisch abgeprüft, ob nicht eine geringere Leckausdehnung zu einem schlimmeren Fall führt oder ob möglicherweise Zwischenflutungszustände schlimmer sind.

Dabei ist der errechnete Indexwert relativ robust bezüglich der Anzahl der Ziehungen, obwohl natürlich mehr Ziehungen zu mehr Leckfällen führen. Aus Abb. 5 wird anhand eines Beispiels aus den Validierungsrechnungen deutlich, dass bereits bei ca. 100.000 Ziehungen alle Fälle mit voller Eindringtiefe gefunden werden (rote Kurve). Aber selbst bei 1.000.000 Ziehungen kommen noch weitere Leckfälle hinzu, diese haben dann aber so geringe Trefferwahrscheinlichkeiten, dass sie praktisch nichts mehr zum Index beitragen. Aber selbst mit 1.000.000 Ziehungen dauert die gesamte Rechnung nicht länger als 1-2 Minuten.

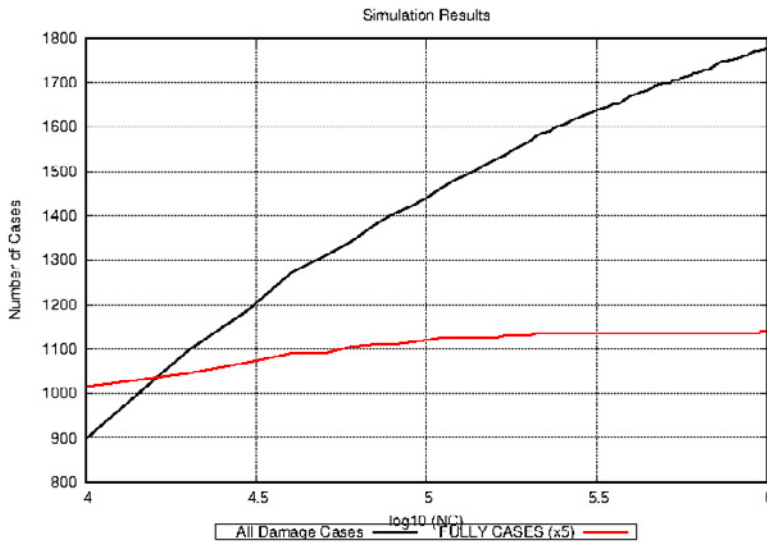


Abb. 5: Verlauf summierte Wahrscheinlichkeiten und erreichter Index über Anzahl Leckfälle

2.3 Modellierung des Bodens

Die Bergungssimulation beginnt mit anderen Voraussetzungen als die Leckrechnung. Das Schiff liegt in der Regel auf dem Grund. Deshalb muss dieser in der Simulation mit modelliert werden. Der Boden kann dabei unterschiedliche und vor allem nicht plane Geometrien aufweisen. Außerdem variiert die Bodensteifigkeit. Gesunkene Schiffe liegen in der Regel auf der Seite, d.h. die Bergung besteht häufig aus einem kombinierten Dreh- und Hebemanöver. Dies verändert die relative Position des Schiffes zum Boden und damit auch die statischen Auflager während des Bergungsvorgangs. Um diesen Problemen zu begegnen, wurde ein Ansatz einer Mehrphasen-Hydrostatik entwickelt und implementiert. Statt eines einheitlichen Wasserkörpers für die Hydrostatik werden mehrere Umgebungsräume definiert. Die Trennflächen werden durch Polygonflächen modelliert. Die Hydrostatik wird dann für die Wasser- und Bodenphasen mit unterschiedlichen Dichten modelliert.

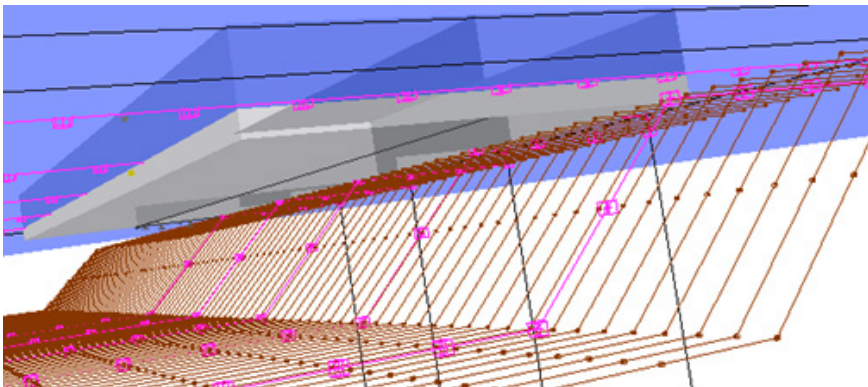


Abb. 6: Modellierte Bodenstufe mit Barge als Schwimmkörper

Der Ansatz ermöglicht es sämtliche Berechnungen der Hydrostatik, wie zum Beispiel die Ermittlung von Hebelarmkurven oder Längsbiegemomenten durchzuführen.

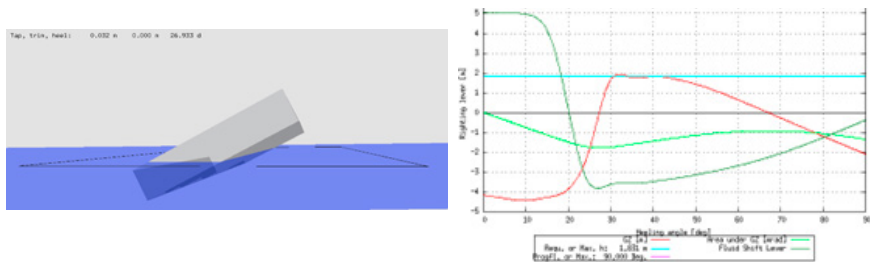


Abb. 7: Krängung Ponton auf dem Boden (Boden nicht dargestellt, links) und Hebelarmkurve (rechts)

3. DIREKTE ALTERNATIVE NACHWEISE

3.1 Flutungsberechnung und Zwischenflutungszustände

Die klassische Leckrechnung basiert auf dem Prinzip des fortfallenden Auftriebs und betrachtet nur die Endschwimmlage des Schiffes nachdem alle als beschädigt angenommenen Bereiche der wasserdichten Unterteilung mit Wasser geflutet sind und sich die Wasserstände zwischen den Räumen und nach außen ausgeglichen haben. Auch diskrete Zwischenschritte sind nach aktueller Vorschrift zu betrachten, siehe hierzu auch den nächsten Abschnitt. Eine zeitliche Auflösung bis hin zum Erreichen der Endschwimmlage wird allerdings nicht betrachtet.

Eine solche quasi-statische Flutungssimulation im Zeitbereich wurde in den letzten Jahren entwickelt und fortwährend erweitert (Dankowski). Dabei wurde auch ein vereinfachtes dynamisches Bewegungsmodell vorgesehen. Kurz skizziert basiert die Methode auf der Ermittlung der Volumenströme an definierten Öffnungen bedingt durch die Druckdifferenz zwischen den wasserdicht getrennten Bereichen oder zur See. Zu jedem Zeitschritt werden die sich neu ergebenden Füllstände in Abhängigkeit der neuen Volumina ermittelt und eine neue quasistatische Gleichgewichtslage in Abhängigkeit der neuen Verteilung des Leckwassers im Inneren des Schiffes ermittelt, weiteren Details hierzu sind in den entsprechenden Veröffentlichungen zu finden (Dankowski) (Dankowski, Russell & Krüger) (Dankowski & Krüger).

Daher sind auch nach Vorschrift bestimmte Zwischenschritte dediziert zu betrachten. Hierbei wird noch zwischen zwei Zuständen unterschieden:

- › vor einer Querflutung
- › Zwischenflutungsschritte (bedingt durch andere Flutungsverzögerungen wie nicht-wasserdichte Wände)

Ein Beispiel für eine solche Zwischenflutungs-Betrachtung ist in Abb. 8 dargestellt, wo der Raum E/R Workshop feuerfest aber nicht wasserdicht vom ECR getrennt ist. Auch ist die

weitere Trennung zu den Räumen mit den LNG Tanks nicht wasserdicht ausgeführt. Trotzdem führt diese feuerfeste Trennung zu einer erheblichen Verzögerung, die insbesondere im Detail zu betrachten ist, wenn durch unsymmetrische Flutung große Krängungswinkel bis zum Erreichen der Endschwimmlage zu erwarten sind.

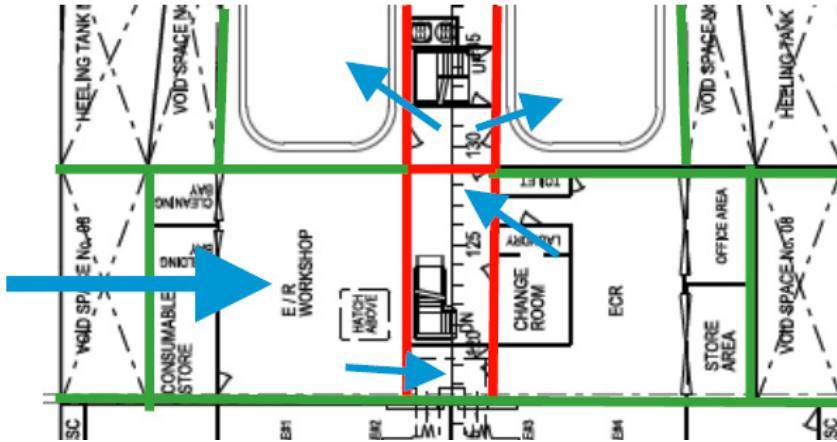


Abb. 8: Flutungsbehinderung durch feuerfeste Trennungen (Wasserdicht: grün; feuerfest: rot)

Ein spezieller Fall von einem kritischen Zwischenflutungszustand ist die Querflutung. Diese ist immer dann zu betrachten, wenn größere Räume wie beispielsweise Leerzellen (siehe Abb. 9) prinzipiell symmetrisch sind, die beiden Seiten aber nur über einen schmalen Kanal oder auch nur ein Rohr miteinander verbunden sind. Dadurch kann die Flutung der unbeschädigten Seite signifikant verzögert werden und ein von der Stabilität sehr viel kritischerer Zustand vor der Endschwimmlage vorliegen und sogar zum Kentern führen.

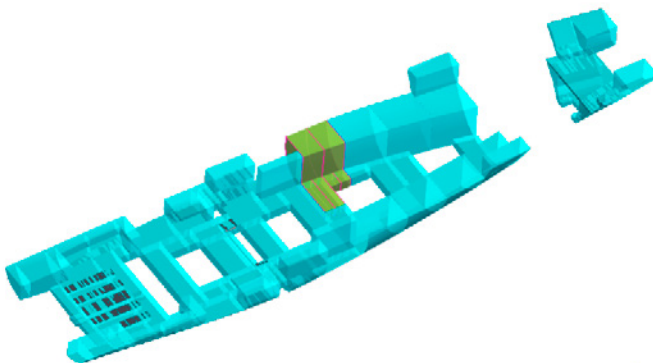


Abb. 9: Typische Anordnung von im Doppelboden quergefluteten Leerzellen

3.2 Operative Leckrechnung (OLR)

Die grundlegende Idee der OLR ist, die Lecksicherheit analog zur Intaktsicherheit eines Schiffes zu bewerten. Das bedeutet vor allem, einen Lecksicherheitsnachweis zu erbringen, der die tatsächlichen Tankfüllstände eines Ladefalls berücksichtigt. Da die mittels konventioneller Leckrechnung erstellten GM-Grenzkurven praktisch immer unter der Annahme leerer Tanks berechnet werden, lassen sich durch die Berücksichtigung der Tankfüllungen eines spezifischen Ladefalls oft Reserven in der Lecksicherheit heben.

Beispielsweise führt das Beschädigen eines Ballasttanks, der sich unterhalb der Wasserlinie befindet, abhängig vom intakten Füllstand des Tanks auf unterschiedliche Krängung in der beschädigten Gleichgewichtslage. Ein leerer Tank führt zu maximaler, ein voller Tank zu - angenommen die Dichten der ein- und ausströmenden Medien sind gleich - gar keiner Krängung. Befinden sich (teil-)gefüllte Tanks oberhalb der Wasserlinie, kann auch der gegenteilige Effekt eintreten. Insgesamt führt die Berücksichtigung von Tankfüllungen in der OLR bei gleichem GM zu einem höheren erreichten Index als nach konventioneller Rechnung, da sich mittels OLR meist günstigere Endschwimmlagen (größere σ_i -Werte) einstellen. Dies führt natürlich auch dazu, dass sich mittels OLR der gleiche Index bei kleinerem GM einstellt.

In Tabelle 1 sind einige Ladefälle eines Schwergutschiffs sowie erreichte Indices nach konventioneller und operativer Leckrechnung aufgeführt. Die metazentrische Höhe von $GM=0.8\text{ m}$ ist die Mindeststabilität nach konventioneller Leckrechnung. Während Fall 1 eine operative Reserve von knapp 5% hat und sich somit auf Fall 1a mit 5 cm weniger GM sicher reduzieren lässt, fällt die Reserve bei allen anderen Fällen kleiner aus.

Tab. 1: Beispielladefälle mit zugehörigen konventionellen und OLR-Indices; möglicher Reduzierung von GM (1a)

ID #	Desc	T _{AP} m	Trimm m	GM m	Konventionell			OLR			Reserve
					A _{PS} -	A _{STB} -	A _{konv} -	A _{PS} -	A _{STB} -	A _{OLR} -	OLR/konv -
1	Full Dep	8.487	0.010	0.800	0.661	0.5804	0.6209	0.7111	0.5900	0.6506	1.048
1a	Full Dep mod.	8.487	0.010	0.750	0.6584	0.5787	0.6186	0.6664	0.5887	0.6276	1.015
2	Full Arr	8.196	-0.551	0.800	0.7552	0.6053	0.6803	0.7671	0.6006	0.6839	1.005
3	Partial Dep	7.980	-0.717	0.800	0.7690	0.6472	0.7081	0.7822	0.6381	0.7102	1.003
4	Partial Arr	7.258	-0.459	0.800	0.8023	0.7422	0.7723	0.8250	0.7458	0.7854	1.017

Derlei Betrachtungen können im Betrieb von Schiffen genutzt werden, um für einzelne Reisen, die die konventionellen GM-Grenzen nicht einhalten können, einen äquivalenten, ladefallabhängigen Lecksicherheitsnachweis zu erbringen. Dies kann Schiffsbetreibern den entscheidenden Vorteil einbringen, der das Verschiffen einer besonders kritischen Ladung sicher möglich macht. Besonders Schiffe ohne einen echten Design-Tiefgang, also solche mit sehr breitem Betriebsprofil, können von diesem Ansatz profitieren, da es hier nicht praktikabel ist, die GM-Grenzkurve für einen bestimmten Tiefgang zu optimieren.

Aufgrund des vollautomatisierten Berechnungsprozesses und der geringen Rechenzeit wäre es sogar möglich, die operative Leckrechnung in bordseitige Ladungsrechner zu integrieren. Somit stünde einer ladefallabhängigen Lecksicherheitsprüfung praktisch nur noch der (noch nicht vorhandene) regulatorische Rahmen im Weg.

3.3 Hebevorgänge

Für die Hebevorgänge müssen einzelne Schritte mit entsprechenden Ballastierungen und externen Kräften definiert werden. Für jeden Schritt muss die Gleichgewichtslage bestimmt werden. Bergungsvorgänge werden in der Regel langsam und kontrolliert durchgeführt. Deshalb ist eine statische Betrachtungsweise ausreichend. Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Methode implementiert, die eine schrittweise Definition von Ballastwasseroperationen und Anpassungen der Beladung ermöglicht.

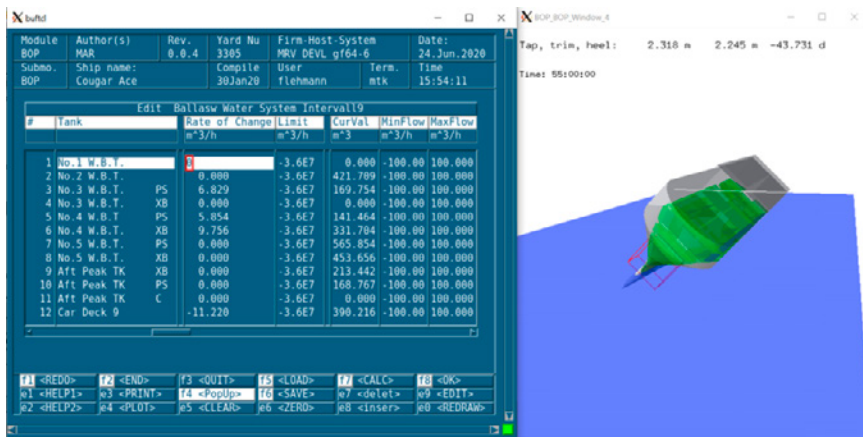


Abb. 10: Definition einer Bergungssequenz

Das Vorgehen wurde zum Beispiel am Vorgang des Aufrichtens eines Autotransporters erprobt. Im Rahmen der Definition der Sequenzen lässt sich zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Vorgangs die Stabilität auswerten und prüfen.

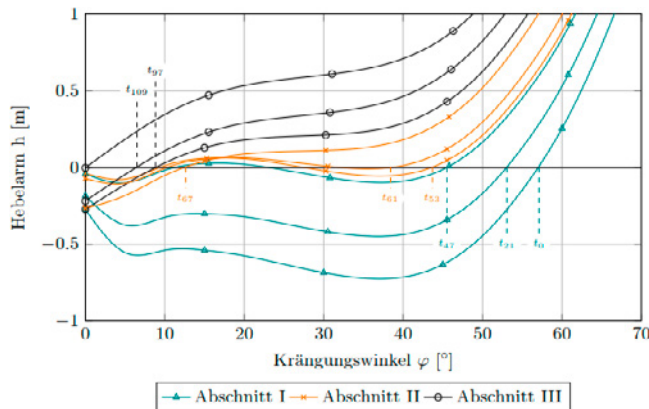


Abb. 11: Hebelarmkurven zu unterschiedlichen Zeitpunkten einer Bergungssequenz

4. DIGITALE DOKUMENTATION

4.1 Schnittstellen als elementarer Bestandteil zu digitalen Prozessen

Als wesentlicher Bestandteil sind verschiedene Exportmöglichkeiten zu schaffen, um die Ergebnisse über diese Schnittstellen in andere Prozesse einbinden zu können. Die Grundlage stellt dabei die wasserdichte Unterteilung des Schiffes dar, welche auch alle relevanten Öffnungen im Schiff und nach außen betrifft. Viele für den Bau des Schiffes nötigen Unterlagen (z. B. der Damage Control Plan, maximale Druckhöhen an wasserdichten Schotten, Positionierung von wetterdichten Öffnungen in der Außenhaut etc.) werden auf der Basis der Leckrechnung erzeugt. Somit wird eine Datendurchgängigkeit geschaffen.

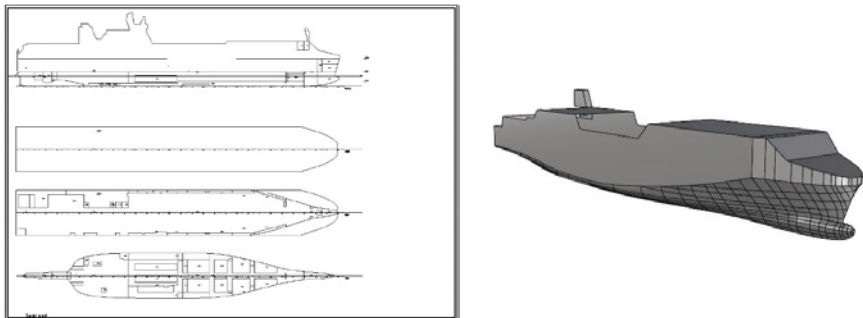


Abb. 12: Generalplan-Export (links) und Rumpfformexport (rechts)

Um ein Beispiel zu nennen, stellen die Rumpfform (Abb. 12 rechts) sowie die Raumbeschreibung und damit der Generalplanentwurf (Abb. 12 links) ein wesentliches Ergebnis der Leckrechnung dar, welche auch den Input für den Stahlentwurf liefern, der im späteren schiffbaulichen Prozess die Eingangsgröße für die Stahlkonstruktion und Ausrüstung liefert (Abb. 13). (Schütze, 2020)

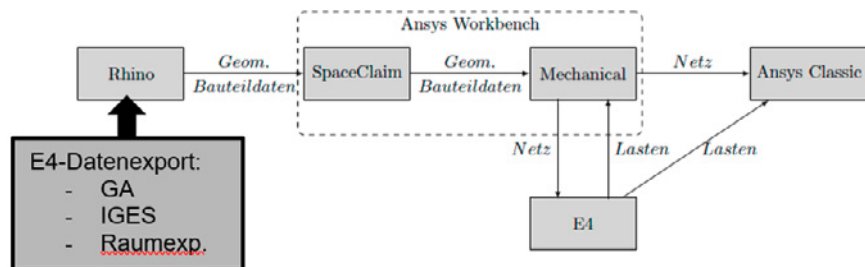


Abb. 13: Datenfluss zur Schnittstelle Stahlentwurf (Schütze, 2020)

4.2 Validierung

Wegen der immensen Datenmengen ist die Validierung der Leckrechnung sehr kompliziert. Daher ist eine Validierung in folgenden Teilprozessen erfolgt:

- › Validierung von einzelnen Berechnungskernen gegen bekannte Fälle
- › Vergleich mit Leckstabilitätsberechnungen in E4/SEStS mit der konventionellen Leckrechnung

Ein Beispiel eines relevanten Validierungsfalls ist in Abb. 14 dargestellt, wobei die Ergebnisse mithilfe der Leckdreieck-Darstellung der neu aufgesetzten Leckrechnung eines Validierungsfall (links) und der bisherigen Leckrechnung (rechts) verglichen werden.

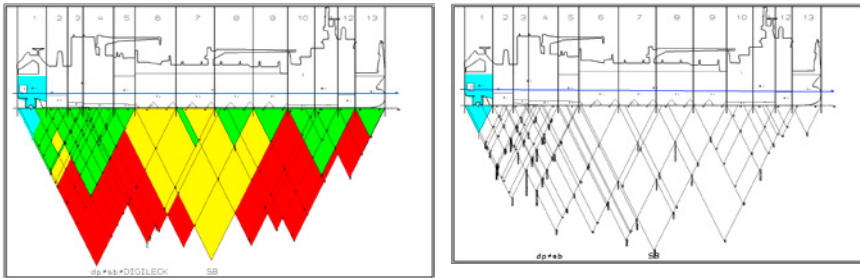


Abb. 14: Leckdreieck Darstellung der neu aufgesetzten Leckrechnung eines Validierungsfall (links) und der bisherigen Leckrechnung (rechts)

Des Weiteren konnte im Vergleich der Indices-Berechnung speziell für die höheren Tiefgänge ein erhöhter erreichter Index nachgewiesen werden (Tab. 2), welcher auf den verbesserten Leckrechnungsprozess zurückzuführen ist.

Tab. 2: Vergleich der erreichte Indices der konventionellen und neu aufgesetzten Leckrechnung

	Konventionelle Leckrechnung		Neuaufgesetzte Leckrechnung	
	Backbord	Steuerbord	Backbord	Steuerbord
Lowest Draft	0,9030	0,8837	0,9030	0,8837
Partial Draft	0,7656	0,7333	0,7655	0,7332
Subdivision Draft	0,4876	0,4787	0,5026	0,4811

Bereits während der Implementierung sind Berechnungen der Leckstabilität mit den entwickelten Methoden für verschiedene alte und aktuelle Schiffbauprojekte durchgeführt worden. Die Anwendung für verschiedene Schiffstypen hilft, auftretende Fehler frühzeitig zu finden.

Die neue Leckrechnung ist somit auch für kleinere Schiffe anwendbar. Die entwicklungs- begleitende Validierung wurde deshalb auch im weiteren Projektverlauf auf andere Anwendungsfälle angewandt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Inhalte des Forschungsvorhabens Digileck wurden aus den formulierten Zielen abgeleitet. Ausgangspunkt waren die folgenden Arbeitspakete, welche für die unterschiedlichen, schiffbaulichen Betrachtungsweisen Entwurf – Bau – Betrieb – Bergung bearbeitet worden sind:

- › AP 1: Prozess-Redesign
- › AP 2: Digitale Infrastruktur
- › AP 3: Numerische Berechnungsgrundlagen
- › AP 4: Direkte alternative Nachweise
- › AP 5: Digitale Dokumentation

Die Fragestellungen des Vorhabens konnten umfassend beantwortet werden und einen wesentlichen Fortschritt in den Prozessen und der Qualität der Ergebnisse liefern. Zudem ist der eigentliche Leckrechnungsprozess optimiert, sodass Sicherheitsreserven reduziert werden konnten. So sind jetzige Entwürfe von Passagier- und Offshoreschiffen mit nur geringfügigen Änderungen an das höhere Sicherheitsniveau der SOLAS 2020 anpassbar, weil durch intelligentere Berechnungen ein ca. 5% höherer Sicherheitsindex erreicht wird. Weiterhin ist es möglich durch eine operative Leckrechnung Schiffe auf Teiltiefgängen flexibler zu betreiben, so dass Ladefälle mit einem um ca. 10cm höherem als durch bisherige KG- Grenzkurven bestimmten Gewichtschwerpunkt gefahren werden können. Als weiteres Ergebnis ist die Berechnung von Bergungsvorgängen zu nennen, die im Ernstfall erhebliche Umweltschäden verhindern können.

DANKSAGUNG

Das gesamte Projektkonsortium bedankt sich für die Unterstützung vom Projektträger Jülich bei der Projektbearbeitung und -koordinierung. Weiterhin gilt unser Dank dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, die das Verbundprojekt Digileck 4.0 durch die Förderung ermöglicht haben.

LITERATUR

- [1] Bulian, G., Cardinale, M., Francescutto, A., & Zaraphonitis, G. (2019). Complementing SOLAS damage ship stability framework with a probabilistic description for the extent of collision damage below the waterline. *Ocean Eng.*, vol. 186.
- [2] Dankowski, H. (2013). A Fast and Explicit Method for the Simulation of Flooding and Sinkage Scenarios on Ships. Hamburg University of Technology, Institute of Ship Design and Ship Safety.
- [3] Dankowski, H., & Krüger, S. (2011). On the safety level of the SOLAS 2009 damage stability rules for RoPax vessels. *Mar. Syst. Ocean Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 87–96.
- [4] Dankowski, H., & Krüger, S. (2015). Dynamic Extension of a Numerical Flooding Simulation in the Time-Domain. in 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles.
- [5] Dankowski, H., Russell, P., & Krüger, S. (2014). New Insights into the Flooding Sequence of the Costa Concordia Accident. in Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2014, no. OMAE2014-23323.
- [6] IMO. (2013). Resolution MSC.362(92) - Recommendation on a standard method for evaluating crossflooding arrangements.
- [7] IMO. (2017). Resolution MSC.421(98) - Amendments to the International Convention for the Safety Of Life at Sea, 1974, as amended. London UK.
- [8] IMO. (2017). Resolution MSC.429(98) - Revised Explanatory Notes to the SOLAS Chapter II-1.
- [9] Lützen, M., & Jensen, J. J. (2002). Damage Distributions.
- [10] Ruponen, P., Lindroth, D., Routi, A. L., & Aartovaara, M. (2019). Simulation-based analysis method for damage survivability of passenger ships. *Sh. Technol. Res.*
- [11] Ruponen, P., Queutey, P., Kraskowski, M., Jalonen, R., & Guilmineau, E. (2012). On the calculation of crossflooding time. *Ocean Eng.*, vol. 40, pp. 27–39.
- [12] Schütze, S. (2020). Entwicklung eines Plug-ins zur Erstellung eines flächenbasierten Schiffsmodells mithilfe des CAD-Programms Rhinoceros 3D.

ECOCAB –

DIE AUTARKE UND NACHHALTIGE NIEDRIGENERGIEKABINE

AUTOREN

SVENJA WÜSTERMANN	MAC HAMBURG
DR.-ING. BENEDICT HOLBEIN	MAC HAMBURG
KURT SOMMER	MEYER WERFT
KAMILA SZWEJK	LEUPHANA UNIVERSITÄT LÜNEBURG
PROF. DR. MICHAEL BRAUNGART	LEUPHANA UNIVERSITÄT LÜNEBURG
MAREIKE SUNDERMANN	LEUPHANA UNIVERSITÄT LÜNEBURG
DR. PATRICK SCHWAGER	DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUM- FAHRT-INSTITUT FÜR VERNETZTE ENERGIESYSTEME
HEINZ BEKEBROK	DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUM- FAHRT-INSTITUT FÜR VERNETZTE ENERGIESYSTEME
MAREIKE TIPPE	DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUM- FAHRT-INSTITUT FÜR VERNETZTE ENERGIESYSTEME
ELIAS JORDAN	DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUM- FAHRT-INSTITUT FÜR VERNETZTE ENERGIESYSTEME
KATRIN LENZ	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP
TOBIAS SCHÖNER	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP
SUKHJOT KLER YOUNG	EPEA
CARSTEN HAELING	EPEA
DR.-ING. PETER MÖSLE	EPEA
DR. JAN VON DEN LANCKEN	EPEA

1. NACHHALTIGKEIT IM KABINENBAU (PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNG)

Nach dem Klimaschutz ist Materialnachhaltigkeit die größte Herausforderung der Menschheit. Unsachgemäße Entsorgung von Abfall ist bereits heute ein großes Problem. Da nicht zu erwarten ist, dass Abfallentsorgung auch in Zukunft so billig ist wie bisher, stellt die ungeklärte Entsorgungsfrage ein großes wirtschaftliches Risiko dar.

Sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen, besteht die Notwendigkeit für nachhaltige Materialien. Eine ganzheitliche Kreislaufwirtschaft ist nur dann möglich, wenn sie von vornherein eingeplant wird.

Auch vor diesem Hintergrund unterhalten das BMWK und der PtJ das maritime Forschungsprogramm [1], in dem unter anderem auch Forschung an umweltschonenden

maritimen Technologien finanziert wird. Aus diesem Programm wurde das Forschungsprojekt EcoCab gefördert, in dem eine nachhaltige Niedrigenergiekabine entwickelt wurde.

Kabinen haben einen bedeutenden Einfluss auf die Nachhaltigkeit eines Kreuzfahrtschiffes, da sie einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der - insbesondere bei Renovierungen - auf dem Schiff eingesetzten Materialien abbilden.

Da es sich bei einer Kabine um ein sehr diverses, aber dennoch kleines, abgeschlossenes System handelt, das durch seine Multiplikator-Wirkung große Auswirkungen auf die Bilanz eines Schiffes hat, bilden Kabinen den perfekten Ausgangspunkt für Anstrengungen in Richtung eines nachhaltigen Schiffes.

Die quantitative Bewertung und Analyse von Aspekten der Nachhaltigkeit im Schiffbau erfordert die Definition eines umfassenden Qualitätsverständnisses und die Etablierung eines geeigneten Beurteilungsrahmens. Da diese für die Nachhaltigkeitsbewertung innovativer Produktlösungen im maritimen Bereich noch nicht vorhanden sind, hat das Projekt EcoCab hierzu spezifische Kriterien für den Schiffskabinenbau abgeleitet und entwickelt, die durch die Auswahl wissenschaftlich geeigneter Methoden gestützt werden. Mit Hilfe dieses Ansatzes können nun Lösungen zur Weiterentwicklung der Schiffskabine sowohl in den Dimensionen Ökologie, Ökonomie, Soziales als auch in der Dimension Technik analysiert und in Bezug auf Nachhaltigkeitspotenziale eingeordnet werden. Der Beurteilungsrahmen unterstützt damit einerseits die Entscheidungsfindung und Produktoptimierung und andererseits die Kommunikation mit Schiffseignern und Passagieren.

Ausgangspunkt des Nachhaltigkeitsverständnisses im Projekt EcoCab bilden allgemeine Konventionen (z. B. auf Basis des Brundtland-Berichts [2]) und Ansätze aus Zertifizierungssystemen für die Nachhaltigkeit von Gebäuden (z. B. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, DGNB [3]), die für den maritimen Bereich adaptiert werden. Auch spezifische Qualitätsanforderungen der Produktnachhaltigkeit, wie sie z. B. seitens des Cradle to Cradle (C2C) [4] Designprinzips definiert werden, werden hierbei integriert.

Das Qualitätsverständnis der zukünftigen, nachhaltigen Schiffskabine (und damit auch des mit dem Projekt EcoCab verbundenen Weiterentwicklungsziels) ist die modulare, vernetzte, autarke, flexible, kreislauffähige und gesunde Schiffskabine. Sie ist umfassend nutzenstiftend und sollte dem C2C-Designprinzip entsprechen, um den heutigen und nachfolgenden Generationen einen Mehrwert zu bieten. Aus ökonomischer Sicht zeichnet sie sich durch Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebensweg aus. Es werden insbesondere langfristig positive betriebs- und volkswirtschaftliche Effekte erzielt und dies auch weit über den Einsatz als Schiffskabine hinaus. Aus sozialer Perspektive besticht sie durch Materialgesundheit für Mensch und Umwelt und ein gutes Raumklima. Positive soziale Auswirkungen innerhalb von Lieferketten sowie während der Phasen Bau, Nutzung und Demontage, werden gefördert, weshalb die nachhaltige Schiffskabine auch über die Lebensdauer hinaus zum menschlichen Wohlergehen beiträgt. Unter

ökologischen Gesichtspunkten definiert sie sich durch regenerative Kreisläufe bezogen auf Energie und Materialien. Energie für die Herstellung und den Betrieb der Kabine stammt aus erneuerbaren Quellen. Die Kabinenkomponenten sind sortenrein trennbar, um die verwendeten Materialien in biologische oder technische Nährstoffkreisläufe zurückzuführen, wodurch stoffabhängig eine Folgenutzung oder ein Recycling ohne Qualitätsverlust ermöglicht wird. Das Design und die Materialauswahl für die nachhaltige Schiffskabine ermöglichen positive Wirkungen auf Mensch und Umwelt, von der Produktion über die Nutzung und das Recycling bis hin zur Wiedernutzung der Materialien oder Komponenten. Damit werden Schiffskabinen sozial gerecht und zu langlebigen und werthaltigen Rohstoffdepots, welche die Ressourcen nach dem Ende der Nutzungszeit wieder freigeben und somit zum Werterhalt des ganzen Schiffes beitragen.

In Sinne dieses Qualitätsverständnisses wurden eine nachhaltige Passagierkabine und die dafür erforderlichen Technologien entwickelt. Das sind insbesondere nachhaltige Materialien, eine effiziente dezentrale Klimatisierung sowie effiziente Energietechnik mit Energy Harvesting.

2. POTENZIALE DER ZUKÜNFTIGEN SCHIFFSKABINE AUS DER NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG



Abb. 1: In Nachhaltigkeitsbewertungen werden möglichst gleichermaßen soziale, ökologische wie auch ökonomische Wirkungen von Technologie, Dienstleistungen oder Produkten erhoben.

Eine Nachhaltigkeitsbewertung adressiert nach allgemeinem Verständnis die Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales (Abb. 1). Um entsprechende Potenziale und Wirkungen in diesen Dimensionen messbar zu machen, haben sich u.a. die Methode der Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessments (LCA) [5, 6]) und der Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing (LCC) [7, 8, 9]) etabliert. Soziale Wirkungen können über die weniger weit ausgereifte Methode der Sozialbilanz (engl. Social Life Cycle Assessment, S-LCA [10, 11]) berücksichtigt werden. Diesen Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung ist u. a. der Gedanke des Produktlebenszyklus gemeinsam. Sie unterstützen im Projekt EcoCab entwicklungsbegleitend, um potenzielle ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen der angestrebten und untersuchten (technischen) Innovationen frühzeitig abschätzen zu können und Einfluss auf diese und ihre Interdependenzen zu nehmen.

Ausgewählte Kriterien und Ergebnisse zur Nachhaltigkeitsbewertung in den unterschiedlichen Dimensionen und Forschungsschwerpunkten des Projektes werden nachfolgend erläutert. Sie stehen stellvertretend für einen rund 170 Kriterien umfassenden Beurteilungsrahmen, der im Projekt erprobt und maritim spezifisch erweitert wurde sowie Anforderungen des Cradle to Cradle Konzepts berücksichtigt. Die Ergebnisse spiegeln hierbei die Potenziale einer Referenzkabine (State-of-the-Art) und einer in Bezug auf Materialeinsatz (s. Kapitel 3) und Energieversorgung (s. Kapitel 4) optimierten Kabine (EcoCab-Kabine) wider.

2.1. ÖKOLOGISCHE POTENZIALE (ÖKOBILANZ, LIFE CYCLE ASSESSMENT)

Eine Ökobilanz mithilfe standardisierter Methoden der Wirkungsabschätzung zielt darauf ab, unterschiedliche Umweltwirkungen eines Produktes entlang seines Lebenswegs zu erheben und quantifizieren (Abb. 2). Im Rahmen des Projektes wurden die Umweltwirkungen auf Mensch und Umwelt mithilfe sogenannter Endpoint-Indikatoren, wie z. B. damage to human health, damage to ecosystems und damage to resource availability [12] für unterschiedliche Technologie-, Material- und Treibstoffkonfigurationen für den Kabinenbetrieb abgeschätzt.

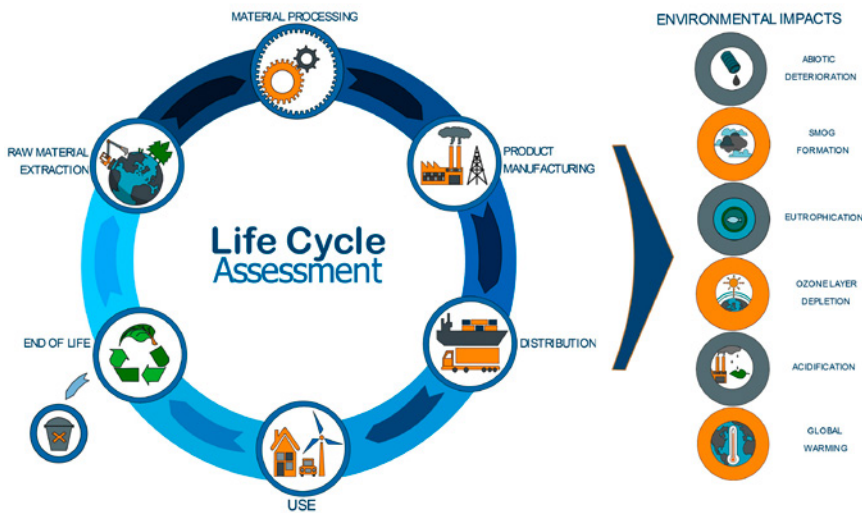


Abb. 2: Mithilfe von Ökobilanzen werden ökologische Wirkungen (rechts) von Produkten oder Technologien entlang des Lebenszyklus (links) auf unterschiedlichen Ebenen abgeschätzt. Die Durchführung ist nach DIN EN ISO 14040 [5] und 14044 [6] standardisiert.

Um Einsparungspotenziale in Bezug auf unterschiedliche Umweltwirkungen im Projekt EcoCab abschätzen zu können, wurde eine Referenzkabine (State-of-the-Art) und eine in Bezug auf Materialeinsatz und Energieversorgung optimierte Kabine (EcoCab-Kabine) gegenübergestellt (Tab. 1).

Tab. 1: Gegenüberstellung der grundlegenden Eigenschaften der Referenzkabine (State-of-the-Art) und der optimierten EcoCab-Kabine.

Veränderung	Referenzkabine (State-of-the-Art)	EcoCab-Kabine
Material	Herkömmliche Materialien	C2C-Materialien
Kraftstoff	Heavy Fuel Oil	Regeneratives Methanol
Photovoltaik	Keine Module	Ca. 7m ² Photovoltaik (Monokristallin) an Trennwänden und Balustrade
Klimatisierung	Zentral	Dezentral
Verglasung	Herkömmlich	Smart Windows (schaltbare Verschattung) mit einem Transmissionsgrad von $g = 0,04$

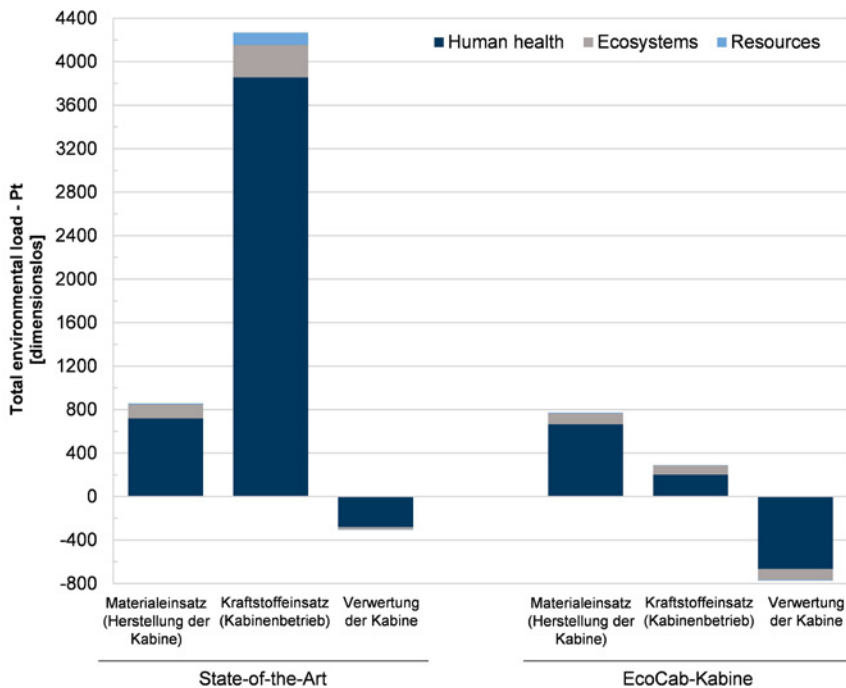


Abb. 3: Ergebnisdarstellung der LCA für die Referenzkabine (State-of-the-Art) und der optimierten EcoCab-Kabine über die Gesamtlebensphase von 30 Jahren [13]. Um die unterschiedlichen Ergebnisse der zu Grunde gelegten Endpoint-Indikatoren mit unterschiedlichen Einheiten vergleichbar zu machen, wird die dimensionslose Größe der "Total environmental load – PT" genutzt. Für die Analyse werden der Einfluss der Kabinenmaterialien, der Betrieb (Kraftstoffeinsatz bzw. -verbrauch) und die Verwertung der Kabinenmaterialien differenziert über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren betrachtet. Die negativen Balken ergeben sich aus der Berücksichtigung des Recyclings als positivem Einfluss, da die Produkte wiederverwendet werden können und keine neuen Ressourcen verbrauchen.

In Abb. 3 [13] sind die Ergebnisse der ökologischen Wirkungsabschätzung für beide Kabinen gegenübergestellt. Durch die Änderung an der im EcoCab-Projekt entwickelten Schiffskabine kann auf einer Route, welche im Sommer in der Ostsee und im Winter in der Karibik verkehrt, eine Verringerung der total environmental load von bis zu 94 % festgestellt werden. Durch die Verwendung von C2C-Materialien in Verbindung mit ihrer optimierten Recyclingfähigkeit kann eine Verbesserung von 11 % erzielt werden. Das größte Einsparpotenzial ergibt sich durch die Verwendung einer dezentralen Klimatisierung (38,3%). Ein etwas kleinerer Beitrag ergibt sich durch die Integration von Photovoltaikmodulen (7,5%) und Smart Windows mit einem Transmissionsgrad von $g = 0,04$ (4,7%). Diese Modifikationen (s. Kap. 4) optimieren in ihrer Gesamtheit den Energiebedarf der EcoCab-Kabine und somit wird weniger Strom über die zentralen Schiffsmotoren bezogen. Zusätzlich wurde das Einsparpotenzial von regenerativem Bio-Methanol als Kraftstoff genutzt, wodurch eine weitere Verbesserung der total environmental load um 33 % realisiert werden könnte.

2.2. ÖKONOMISCHE POTENZIALE (LEBENSZYKLUSKOSTENRECHNUNG, LIFE CYCLE COSTING)

Ähnlich der ökologischen Bewertung mit Hilfe der Methode der Ökobilanz (s. Kapitel 2.1) zielt die Methode der Lebenszykluskostenrechnung (LCC) auf die Analyse unterschiedlicher ökonomischer Potenziale über den Lebenszyklus bei der Weiterentwicklung der Schiffskabine. Grundsätzlich können hierbei sowohl statische als auch dynamische Verfahren in Abhängigkeit der Anwenderperspektive (Abb. 4) zur Anwendung kommen.

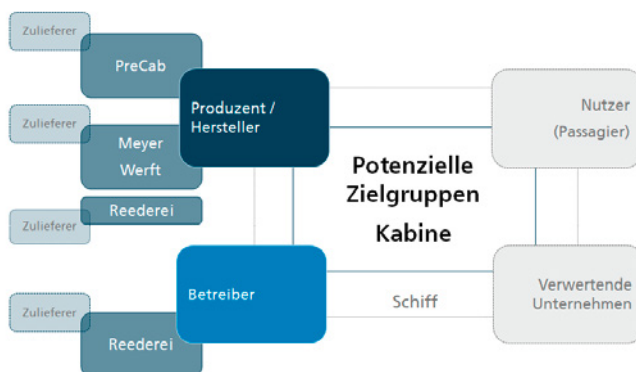


Abb. 4: Potenzielle Zielgruppen (Stakeholder) für die ökonomische Analyse im Projekt EcoCab (eigene Darstellung, Fraunhofer IBP).

Angelehnt an methodische Vorgaben gängiger Normen [7] und Richtlinien [8, 9] wurden die ökonomische Potenziale der Referenzkabine (Abb. 5) sowie der innovativen EcoCab-Kabine (Abb. 6) analysiert. In der Position „Kabinenkonstruktion“ werden sowohl die Herstellung der Kabine (Materialeinsatz), Transporte in der Herstellung als auch der Ersatz/Austausch einzelner Kabinenbestandteile innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 30 Jahren berücksichtigt.

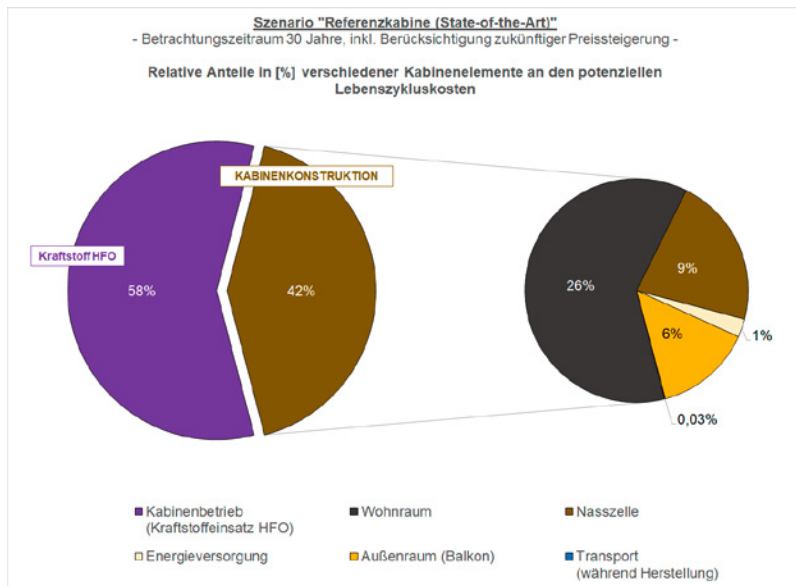


Abb. 5: Referenzkabine (State-of-the-Art) in der Abschätzung ökonomischer Potenziale über den Lebenszyklus (Betrachtungszeitraum von 30 Jahren). Annahmen zur jährlichen Kostensteigerung für die Kabinenkonstruktion beruhen auf dem durchschnittlichen Inflationszinssatz der vergangenen 10 Jahre der Europäischen Zentralbank (EZB) [14]. Für den Kraftstoff Heavy Fuel Oil (HFO) wird ein Kostenkennwert im Startjahr der Analyse (2022) auf Basis der vergangenen 3 Jahre und [15] sowie überschlägig eine jährliche Kostensteigerung von 10 % angesetzt.

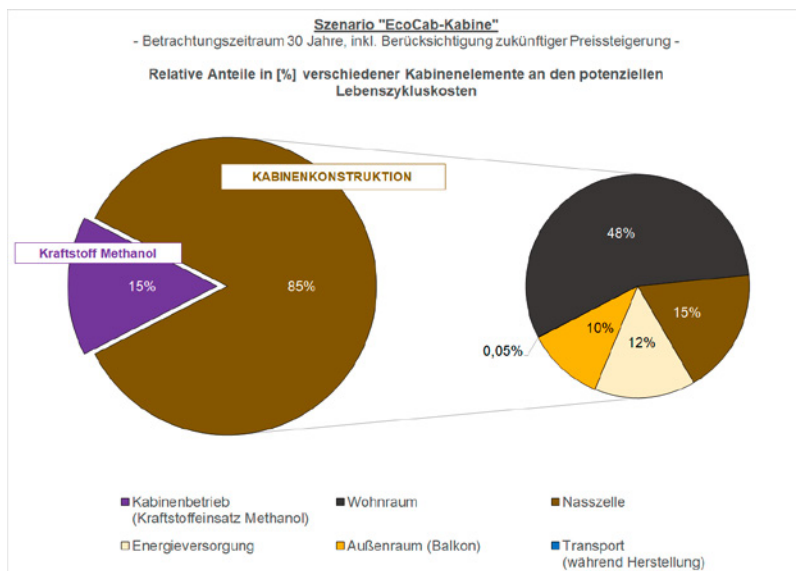


Abb. 6: EcoCab-Kabine in der Abschätzung ökonomischer Potenziale über den Lebenszyklus (Betrachtungszeitraum von 30 Jahren). Eine pauschale Kostensteigerung in Höhe von 20 % auf die Herstellkosten ist für den Einsatz optimierter Materialien (für ausgewählte Kostenpositionen) berücksichtigt. Annahmen zur jährlichen Kostensteigerung für die Kabinenkonstruktion beruhen auf dem durchschnittlichen Inflationszinssatz der vergangenen 10 Jahre der Europäischen Zentralbank (EZB) [14]. Für den Kraftstoff Methanol wird ein Kostenkennwert im Startjahr der Analyse (2022) auf Basis der vergangenen 10 Jahre und sowie eine mittlere jährliche Kostensteigerung von 7,8 % angesetzt [16].

Die Ergebnisse zeigen deutlich die Verschiebungen in den relativen Beiträgen einzelner Kabinenkomponenten (Kabinenkonstruktion) sowie durch veränderte Randbedingungen im Kabinenbetrieb (vgl. hierzu auch Tab. 1, Kapitel 2.1). In der Gegenüberstellung zeigt sich unter den zu Grunde gelegten Randbedingungen ein Potenzial zur Reduktion der lebenszyklusbezogenen Kosten von ca. 35% für die EcoCab-Kabine, die maßgeblich durch Änderungen im Kabinenbetrieb hervorgerufen werden.

Forschungsbedarf, der sich aus der Erprobung der ökonomischen Analyse im Projekt ableitet, besteht insbesondere im Umgang mit der Bewertung der Kabine und ihrer innovativen Materialien am Ende ihrer technischen Lebensdauer. Fehlende Geschäftsmodelle und Kostendaten erschweren hier die Integration im Rahmen der LCC beziehungsweise eines neuen Produktlebenszyklus und können aktuell (noch) nicht berücksichtigt werden.

2.3. ERHEBUNG SOZIALER TREIBER UND HINDERNISSE FÜR DIE IMPLEMENTIERUNG NACHHALTIGER KABINENTECHNOLOGIEN

Die Bewertung sozialer Impacts von Produkten entlang ihres Lebensweges stellt trotz neuer Ansätze [10, 11] aus unterschiedlichen Gründen bis heute eine große Herausforderung dar – nicht zuletzt aufgrund der Fülle an potenziell involvierten Akteursgruppen, einer großen Methodenvielfalt sowie diverser Indikatoren, die der sozialen Nachhaltigkeit zugeordnet werden können (ebd.). Im EcoCab-Projekt lag der Fokus der sozialen Bewertung auf Interviews mit Passagier:innen und Mitarbeiter:innen der Meyer Werft und dem Kabinenbauunternehmen EMS PreCab sowie einer zusätzlichen Befragung von Expert:innen u.a. aus dem Bereich Schiffsrecycling. Mithilfe qualitativer Stakeholder- bzw. Experteninterviews [17, 18] wurden grundsätzliche Hürden und Treiber für die Implementierung und Akzeptanz nachhaltiger Technologien im Kabinenbau abgeleitet. In Tab. 2 sind in stark vereinfachter Form die Aspekte aufgeführt, die als kritisch für eine Implementier- und Umsetzbarkeit der Kabinenkonzepte identifiziert wurden.

Tab. 2: Mithilfe qualitativer Interviews mit Passagier:innen und Mitarbeiter:innen wurden im Rahmen einer induktiven Auswertung [17] für die Implementierung und Umsetzung nachhaltiger Kabinenkonzepte kritische Aspekte identifiziert.

Technische Aspekte	Normen & (juristische) Vorgaben	Anforderungen an das Design	Funktionalität
<ul style="list-style-type: none"> · Gewicht von Kabine & Ausstattung · Grundsätze des Schiffbaus · Geeignet für die Serienanfertigung · Höheres Maß an Standardisierung 	<ul style="list-style-type: none"> · IMO-Regularien · Standards · Brandschutz (Material & Infrastruktur) · Schallschutz · Lieferkettengesetz · Sozialcharta & Verhaltenskodex für Lieferanten 	<ul style="list-style-type: none"> · "Wohlfühl-Kabine" · Moderne Ästhetik · Haptik · Coporate Designs der Reedereien · Möglichst keine (Sicht-) Einschränkungen durch Photovoltaik 	<ul style="list-style-type: none"> · Versorgungssicherheit · Luftqualität · Benutzerfreundlichkeit · Einfache Wartung · Nach-/Umrüstbarkeit · Modularität (C2C, Recycling & Weiterverwendung)

Im EcoCab-Projekt wurde deutlich, dass es eine Bandbreite der miteinander zu vereinbarenden Anforderungen an eine (nachhaltige) Kabine existiert. Als übergeordneter Akzeptanzfaktor für angestrebte Veränderungen wird oftmals das Wohlbefinden und -fühlen der Gäste artikuliert, wobei sich dieser Faktor auf die Nutzungsphase der Kabine beschränkt. Als größtes Hemmnis für die Etablierung nachhaltiger Lösungen werden ökonomische Faktoren wahrgenommen, gefolgt von sich zu langsam anpassenden Regularien, die den Einsatz alternativer Materialien und Technologien erschweren. Im Gegensatz dazu müssen als Treiber für Innovationen vor allem schiffbauliche Aspekte sowie die für Kreislauffähigkeit notwendige Recyclingfähigkeit genannt werden, welche insbesondere für die Lebensphasen Planung und Nutzungsende von großer Bedeutung sind.

3. POTENZIALE VON CRADLE TO CRADLE (C2C) FÜR DEN KABINENBAU

3.1. DAS C2C-KONZEPT UND ZUKUNFTSVISION EINER SCHIFFSKABINE

Neben Ansätzen und Methoden aus der Nachhaltigkeitsbewertung (s. Kap. 2) sind auch Aspekte des Konzeptes Cradle to Cradle (C2C) in die Weiterentwicklung der Schiffskabine mit eingeflossen. Hierbei handelt es sich um ein ganzheitliches, kreislaufwirtschaftliches Konzept [4, 19], welches öko-effektive Lösungen anstrebt (s. Abb. 7). Dabei werden bereits in der Konzeptions- und Designphase Aspekte mitbedacht, welche das Eingehen der eingesetzten Materialien in einen biologischen oder technischen Kreislauf ermöglichen (s. Abb. 8).

C2C Framework by EPEA

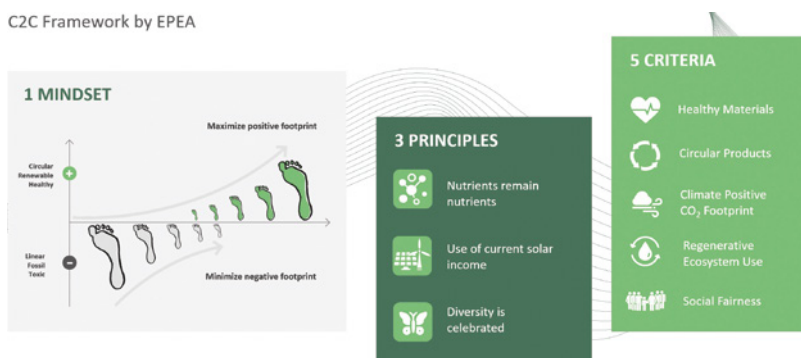


Abb. 7: Das C2C-Framework: C2C-Mindset (Öko-Effektivität), die drei C2C-Prinzipien und fünf Kriterien der C2C-Produktqualität (auf Basis von Braungart et al. 2007, Grafik von EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer 2022).

Das Konzept bietet somit vielfältige Potenziale für den Kabinenbau, um positiven Einfluss auf Mensch und Umwelt zu bewirken sowie neue Geschäftsmodelle zu implementieren. Bei der Entwicklung einer Schiffskabine nach den C2C-Kriterien wurden erstmalig Kriterien berücksichtigt, welche bisher im Kabinenbau eine eher untergeordnete Rolle spielten. Dazu gehören beispielsweise materialgesundheitliche Aspekte, der Erhalt der Materialqualität beim Recycling der Kabinenkomponenten oder die Möglichkeit der Implementierung neuer Rücknahmekonzepte. Die genauen C2C-Kriterien, die bereits in der Nachhaltigkeitsdefinition einer Schiffskabine beschrieben wurden, wurden durch den folgenden Kriterienatz konkretisiert (s. Abb. 9).

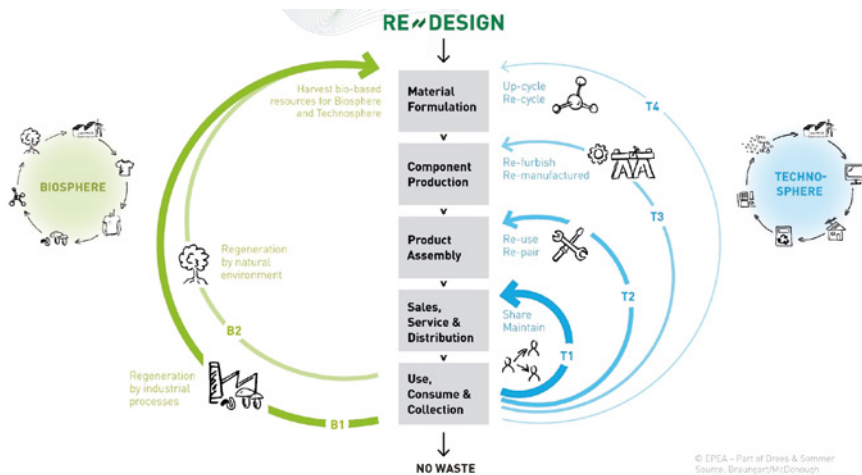


Abb. 8: C2C-Kreisläufe und das Verständnis von Kreislauffähigkeit (auf Basis von Braungart et al. 2007, Grafik von EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer 2022).

Technical Tests			Requirements / Cradle to Cradle Considerations for Companies								
Fire safety regulations	Sound proofing	Strength	Potential Material Health Issues	Recommended Testing	Design for Disassembly Product	Design for Disassembly Cabin	Service Concept or Leasing System	Take-back System	Recycling Process	Recycled content	Renewable energy used in production

Abb. 9: Angepasster Kriterien-Satz für EcoCab (EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer 2022).

Um die Potenziale einer nach dem C2C-Konzept gestalteten Schiffskabine aufzuzeigen, wurde im Projekt zunächst eine Auflistung aller aktuell eingesetzten Kabinenkomponenten und Materialien erstellt. Ein Screening der priorisierten Kabinenkomponenten erfolgte nach C2C-Kriterien im Bereich Materialgesundheit und Recyclingfähigkeit entsprechend der „Cradle to Cradle Certified – Version 3“. Dies wurde auf Basis von Informationen von bestehenden Lieferanten zu den Kabinenprodukten durchgeführt.

Die Kabinenkomponenten wurden in ein Supply Chain Management-System (s. Abb. 10) eingeführt, um den Umgang mit Lieferantendaten zu erleichtern und die Übersicht zu bewahren. Das Management-System ermöglicht es, eine Übersicht der C2C-Qualität von Lieferantenprodukten zu erhalten, ohne Vertraulichkeiten zu verletzen.

Zusätzlich wurde ein Konzept für einen Materialpass entwickelt, welcher die Kreislauffähigkeit bzw. die Identifikation von Optimierungspotenzialen der Kabinenkomponenten aufzeigt und damit den Wandel der Funktion einer Schiffskabine hin zu einer Materialbank unterstützt [20].

Um Einblicke in die real existierenden Prozesse des Recyclings zu erhalten, wurden erste EcoCab-Umfragen mit Schiffsrecycling-Expert:innen durchgeführt. Diese deuten auf aktuell starke Verluste in den Materialqualitäten hin, die mit dem Bedarf nach einem zerstörungsfreien Rückbau von Kabinenkomponenten und Anpassungen bei den Rückbauanlagen und Prozessen einhergehen. Eine Transformation des Schiffsrecyclings im

Sinne einer Kreislaufwirtschaft ist dabei Bedingung für das Schließen der Kreisläufe, wobei eine engere Zusammenarbeit aller beteiligten Akteursgruppen –vom Schiffbau bis hin zum Rückbau– relevant ist.

RE//DESIGN

Digital Twin in TMT (Trustee Materials Toolbox)

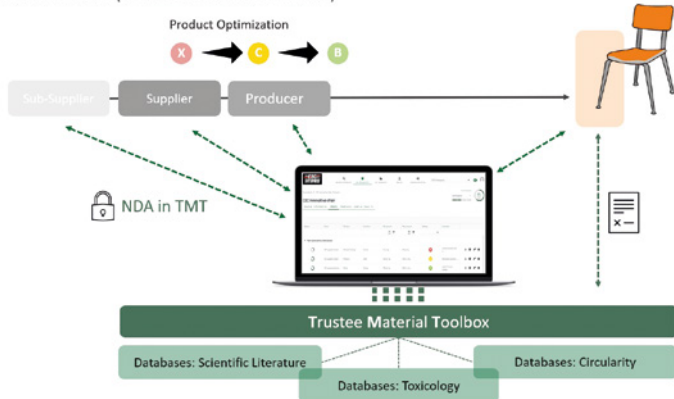


Abb. 10: Der Trustee Material Toolbox (TMT) unterstützt eine sichere und übersichtliche Material Bewertung und Optimierung (EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer 2022).

3.2. ECOCAB-DEMONSTRATOR

Um die Machbarkeit einer dezentralen und nach den C2C-Kriterien entwickelten Schiffskabine aufzuzeigen, wurde eine Demonstrator-Kabine gebaut.

Parallel zum Screening der bestehenden Kabinenkomponenten, wurde nach verfügbaren Alternativ-Materialien und -Produkten mit hohem Kreislaufpotenzial sowie nach Produkten, die bereits den Optimierungsprozess nach C2C begonnen haben, gesucht.

Gemeinsam mit den Produktlieferanten wurden für den weiteren Optimierungsbedarf von Produkten und Prozessen, Lösungen für den Einsatz im Demonstrator erarbeitet. Die im EcoCab-Demonstrator eingesetzten Alternativen zeigen Charakteristiken, die sie nach den im EcoCab-Projekt aufgestellten Bewertungskriterien (s. Abb. 6) dazu qualifizieren. Die ausgetauschten Kabinenkomponenten gingen als Optimierungspotenzial ebenfalls in die durchgeführten Analysen mit ein (s. Kap 2.1 und 2.2).



Abb. 11: EcoCab-Demonstrator aus nachhaltigen Materialien (Standort Kabinenfabrik EMS PreCab, Papenburg).

Insbesondere wurde im Demonstrator eine Auswahl an C2C-zertifizierten Teppichen eingesetzt, die verschiedene technische Ansätze für das Recycling nach dem technischen oder biologischen C2C-Kreislauf repräsentieren. Bei Einbaumöbeln ist die Verwendung von nachhaltigeren Spanplatten eine wesentliche Verbesserung, welche in Zukunft durch besser recycelbare Zelluloseplatten sowie alternative Dekormaterialien ersetzt werden. Da Schäume schwierig zu recyceln sind und zudem einen schlechten Einfluss auf die Raumluftqualität haben, wurde für EcoCab ein Sofa entwickelt, das – wie auch Bett und Matratze – ohne geschäumte Materialien auskommt (Abb. 12). Bei den Wänden konnte auf PVC verzichtet werden. Da das konventionelle Isolierungsmaterial nicht wirtschaftlich recycelt wird, laufen bereits Untersuchungen zu Alternativen.

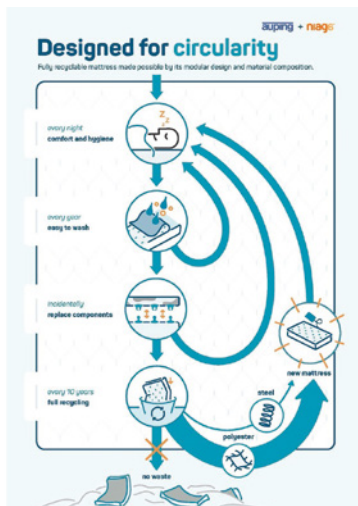


Abb. 12: Ein im Demonstrator eingesetztes Beispielprodukt welches ebenfalls zu einem implementiertem Rücknahmesystem gehört [21].

Zu einem Idealzustand einer C2C-Schiffskabine gehört neben dem Einsatz kreislauffähiger Produkte auch die effiziente Nutzung erneuerbarer Energien.

Die in Kapitel 4 dargestellten technischen Neuentwicklungen der energetisch wichtigsten Teile (dezentrale Klimaanlage und Energieversorgung mit Photovoltaikmodulen), werden im Demonstrator ebenfalls präsentiert.

Zum EcoCab-Demonstrator (Abb. 11) soll neben der in EcoCab entwickelten Schiffskabine ein Ausstellungsbereich gehören, in dem weitere Produktalternativen aufgeführt werden. Der Demonstrator soll nach Abschluss des Projektes als Plattform weitergenutzt werden, an der weitere Entwicklungen erprobt und präsentiert werden können. Zukünftig können so auch nach Abschluss des Projektes nachhaltige Alternativen nachgerüstet werden.

4. ENERGIE & KLIMATISIERUNG

4.1.1. DEZENTRALE ENERGIEVERSORGUNG PHOTOVOLTAIK-INTEGRATION

Im Projekt EcoCab wurden Konzepte zur Integration einer Photovoltaikanlage entwickelt, die es ermöglichen soll eine Kabine dezentral mit Energie zu versorgen. Drei Beispiele sind in Abb. 13 als Designstudien gezeigt. Module sind senkrecht bzw. geneigt, unter der Brüstung, ggf. auf den Trennwänden und unter dem Überstand angebracht. Zur Komponentenanalyse und Konzeptvalidierung der Photovoltaikanlage wurde ein Teststand mit einem Kabinenbalkon realisiert, der es ermöglicht Outdoor-Tests durchzuführen, siehe Abb. 14. Dabei wurde der Kabinenbalkon, inklusive Brüstung und Kabinenverglasung, drehbar aufgestellt. Der Teststand wurde so gestaltet, dass der Einfluss von Einstrahlungswinkeln, Temperatur, Verschattung, Windgeschwindigkeit und Bewölkung auf die Generationsprofile detailliert untersucht und beantwortet werden sollten.



Abb. 13: Designstudien von Photovoltaikanlagen, die am Balkon einer Außenkabine installiert sind. Links: Ein planar installiertes Modul, Mitte: Ein geneigtes Modul, Rechts: Ein geneigtes Modul, zwei an den Trennwänden installierte Module, ein unter der Decke installiertes Modul zur Ausnutzung der reflektierten Strahlung.

4.1.2. MODELLIERUNG DER ERTRAGS- UND LASTKURVEN

Bedingt dadurch, dass ein Großteil der Schiffshülle von Kabinenbalkonen bedeckt ist, steht eine nicht zu vernachlässigende Fläche zur Installation von Photovoltaikanlagen zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde ein Modell erstellt, welches den möglichen solaren Ertrag während einer repräsentativen Kreuzfahrt berechnen kann [22]. Ergebnisse sind in Abb. 15 zu sehen.



Abb. 14: Outdoor-Teststand zur Vermessung der Photovoltaikinstallation auf dem Dach des DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme in Oldenburg. Es wurden dabei darauf geachtet die Designstudien bestmöglich zu berücksichtigen.

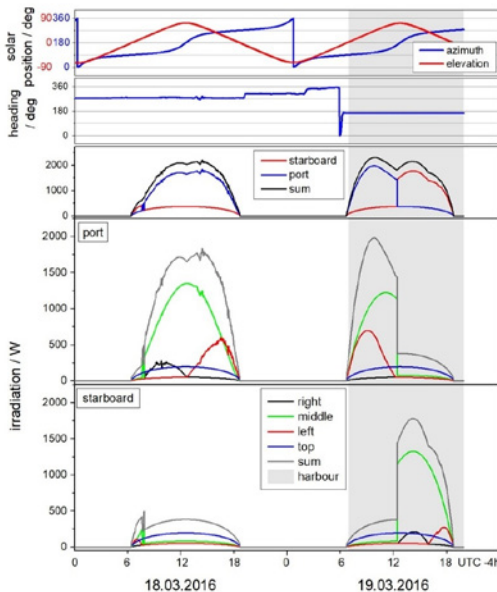


Abb. 15: Modellbasierte Vorhersage der solaren Einstrahlung an zwei Beispieltagen einer Karibikkreuzfahrt auf eine Photovoltaikanlage der Steuerbord- u. Backbordseite. Die Photovoltaikanlage ist in Abb. 13 (rechts) zu sehen. Diese besteht aus vier Solarmodulen: An der rechten und linken Trennwand ist je ein Modul ($140 \times 180 \text{ cm}^2$) montiert, das mittlere Modul ($280 \times 50 \text{ cm}^2$) ist vor den Balkon mit einer Neigung von 30° montiert, ein weiteres Modul ($280 \times 150 \text{ cm}^2$) ist unter der Decke befestigt. Letzteres kann lediglich das von der Wasseroberfläche reflektierte Licht nutzen. Zudem ist im oberen Bereich der Abbildung der Sonnenverlauf sowie die Ausrichtung („heading“) des Schiffes aufgetragen.

Um festzustellen, inwieweit der Energieeintrag über eine Photovoltaikanlage den elektrischen Bedarf in der Kabine decken kann, müssen entsprechende Lastprofile hinzugezogen werden. Aufgrund der sehr geringen Datenlage wurde zu diesem Zweck ein weiteres wahrscheinlichkeitsbasiertes Modell erstellt, welches diese synthetisiert (Abb. 16). Grundlage dafür waren reale Daten der Schlüsselkarte, welche zur Verfügung standen. Diese kommt ebenfalls in Hotels zum Einsatz und spiegelt die Anwesenheit der Gäste wider.

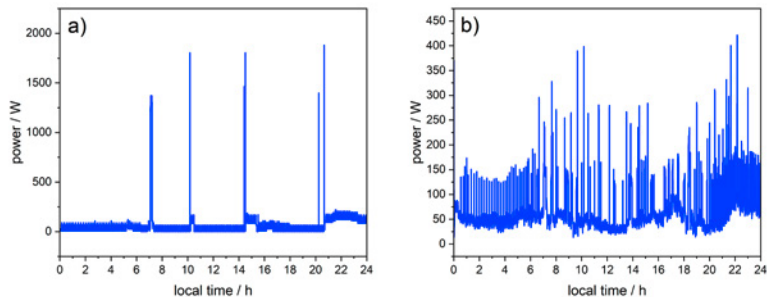


Abb. 16: Lastprofile. a) Tagesprofil einer Kabine, b) Durchschnittslastprofil einer 15-tägigen Karibikkreuzfahrt. Im Modell wird das Benutzerverhalten der Passagiere bzgl. der elektrischen Verbraucher (Fernseher, diverse Beleuchtung in der Kabine und Nasszelle, Kühlschrank, Fön, Klimatisierung) in der Kabine berücksichtigt.

4.2. DEZENTRALE KABINENKLIMATISIERUNG

Ein Bestandteil von EcoCab war die dezentrale Kabinenklimatisierung. Hierfür wurde im Rahmen des Projekts ein dezentrales Klimagerät (ATU, Abb. 17) entwickelt, welches im Gegensatz zu den bisherigen Fan Coil Units (FCU, Abb. 18) in der Kabine selbst temperierte und entfeuchtete Raumluft aus eingespeister Umgebungsluft erzeugt. Das Gerät bringt neben Energieeinsparungen von bis zu 45% aufgrund der Reduzierung von Druckverlusten, der Verringerung der elektrischen Lüfterleistung, zusätzliche Vorteile durch eingespartes Material und Gewicht durch wegfallende Kanäle. Neben dem Energieeinsparpotential aufgrund erhöhter Effizienz und Regelbarkeit, bieten ATUs auch Vorteile bezüglich Redundanz und Hygiene, da Kabinen als einzelne Systeme isoliert und ersetzt werden können.

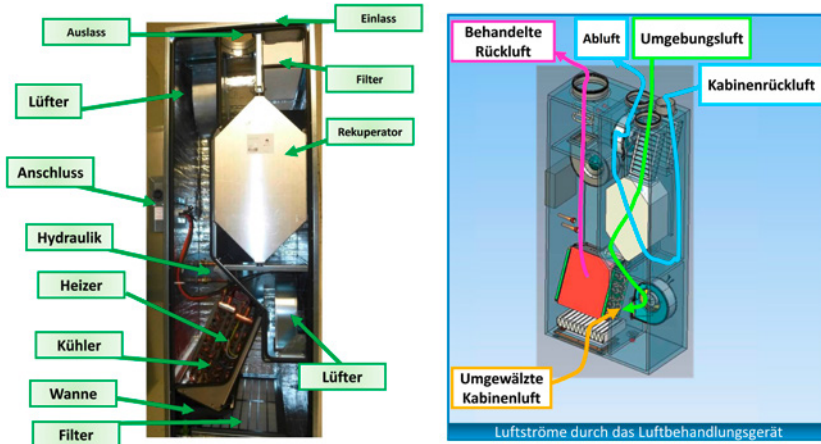


Abb. 17: Foto eines Prototyps der dezentralen Air Treatment Unit ATU mit den Hauptkomponenten (links) und schematische Darstellung der unterschiedlichen Luftströme durch das Gerät (rechts).

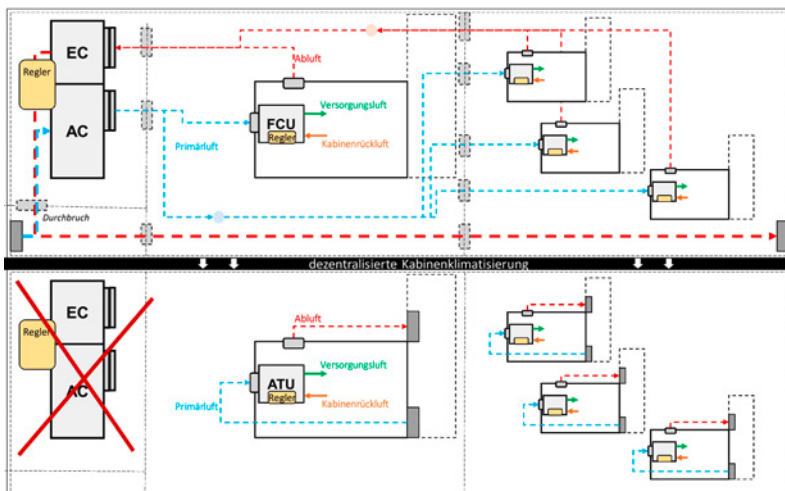


Abb. 18: Anlagenschema im konventionellen Fall, mit zentralem AC-Gerät und Kabinen-Luftkanälen (oben) und mit dezentralen ATUs (unten), direkt versorgt durch Umgebungsluft.

Die Effizienzvorteile der ATUs (Abb. 19 und Abb. 20) zeigen sich vor allem im Teillastbereich, wenn ein erhöhter Regelbedarf herrscht, bei Unterbelegung oder Hafenaufenthalten. Durch Leistungsreduktion sowie reduzierter Leitungslängen und Druckverluste sind Einsparungen von 69% bei der Ventilatorleistung möglich.

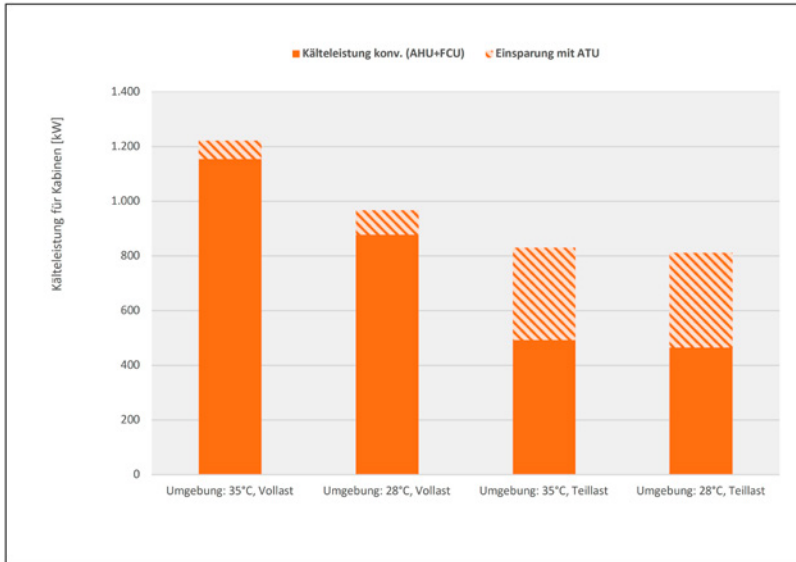


Abb. 19: Errechnete Einsparungen an Kabinen-Kälteleistung durch Einsatz von ATUs (rund 600 Kabinen), bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und Teillast (Gleichzeitigkeitsfaktor 50%) im Vergleich zum konventionellen System.

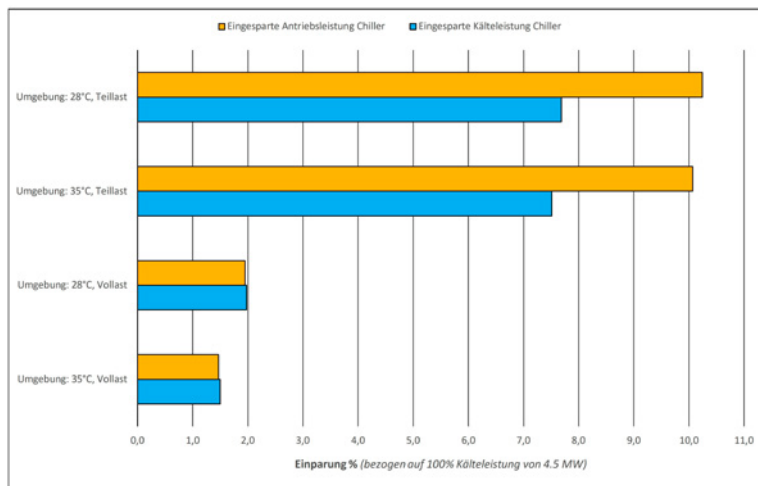


Abb. 20: Eingesparte Kälte- und Antriebsleistungen durch Einsatz von ATUs zur Kabinenklimateuerung im Vergleich zur konventionellen Gesamtkälteleistung von 4,5 MW.

Die theoretische Effizienz konnte mittel Testkabinen an Bord bei einer Versuchsreihe von über einem Jahr und unter Berücksichtigung von schwankenden Umgebungstemperaturen und Feuchten bestätigt werden. Optimierungspotential zeigte sich deutlich bei der Regelung der Einheiten.

Im Landbau wird in der Hotelklimatisierung vermehrt auf Demand Site Management (DSM = Lastmanagement) gesetzt, wodurch eine Auslegung näher am realen Betriebspunkt, energie- und kostensparende Anpassungen an das Energieaufkommen ermöglicht werden [23, 24, 25]. Auch für große Personenschiffe können durch ein zielgerichtetes Lastmanagement signifikante Energieeinsparungen erzielt, eine erhöhte Netzstabilität und Sicherheit erreicht, Versorgeranlagen entlastet und erweiterte Möglichkeiten zur gezielten Abschaltung in Notfällen gewährleistet werden („Safe-Return-to-Harbor“). Das ATU-Konzept bietet die Grundlage für weiterführende Ansätze in diesem Bereich. Hier gewonnene Erkenntnisse können auch als Grundlage für ein ganzheitliches DSM auf Schiffen dienen.

Die ATUs bieten darüber hinaus das Potential innovative Ansätze im Bereich der Kälteversorgung, etwa beim Thema natürliche Kältemittel [26], im Kleinen zu entwickeln und zu erproben oder durch ihre gesteigerte Regelbarkeit und reduzierten Kältebedarf derartige Entwicklungen bei zentralen Großkälteanlagen zu vereinfachen.

Zum Testen der Interaktion von dezentraler Klimatisierung und Kabine unter kontrollierten realen Randbedingungen sowie zur Validierung der Simulationsmodelle aus Kapitel 4.3 wurde am Fraunhofer IBP ein Mock-Up einer Außenkabine erstellt (Abb. 21).



Abb. 21: Mock-Up zur empirischen Validierung der virtuellen Simulationsmodelle sowie zur Vermessung der ATU unter realen Randbedingungen in der MEGA Halle des Fraunhofer IBP am Standort Holzkirchen. Die angrenzenden Zonen, der Fußboden sowie die Außenwand sind hierfür einzeln klimatisierbar.

Für die dedizierte energetische Bilanzierung der Klimatisierung, als einen elementaren Energieverbraucher der Kabine, welcher ebenso zu möglichst hohen Anteilen dezentral versorgt werden soll, wurde eine Testplattform (Abb. 22) am DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme angepasst. Diese erlaubt die reproduzierbare Vermessung der ATU in einem realitätsnahen Testbetrieb. Die Messdaten stehen als Eingangsgrößen von aufbau-

enden Simulationsmodellen und zur Auslegung der Versorgungssysteme zur Verfügung. Ferner wurden energetische Kenngrößen und Optimierungspotentiale ermittelt.

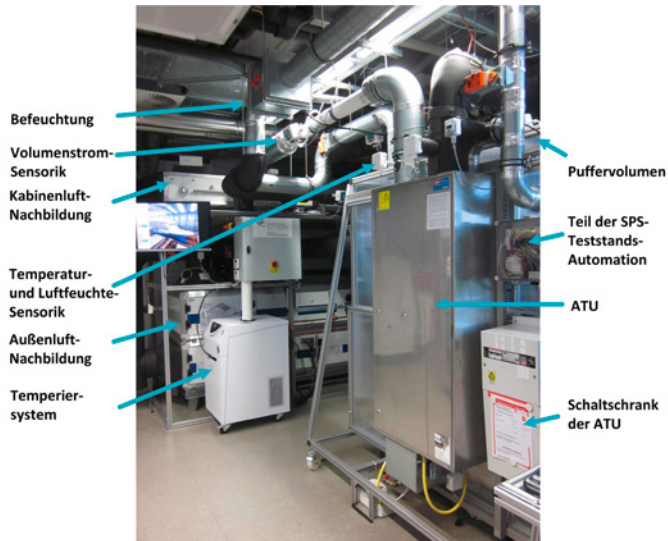


Abb. 22: Thermische Testplattform zur Vermessung des dezentralen Klimatisierungsgeräts (ATU). Diese beinhaltet u. a. eine Nachbildung von Außen- und Kabinenluftkonditionen. Über die implementierte Sensorik, kann an allen Bilanzgrenzen der Energiefluss bestimmt werden.

4.3. VIRTUELLE ENTWICKLUNGSPLATTFORM

Für die Entwicklungsplattform wurden einzelne Simulationsumgebungen zu einer ganzheitlichen virtuellen Entwicklungsplattform zusammengefasst. Zum einen wurde die Simulationsumgebung WUFI® Plus [27] für Fragen zur energetischen Kabinen Performance, der Tauwasserfreiheit sowie dem solaren Wärmeeintrag verwendet zum anderen dient das VEPZO Modell [28] für die Auswertungen zur thermischen Behaglichkeit und der Luftströmung.

Der virtuelle Zwilling der Kabine (Abb. 24) wurde konstruktionsbegleitend zur Weiterentwicklung der Klimatisierungslösungen der EcoCab-Kabine verwendet. Detailfragen, die behandelt wurden, waren unter anderem:

- › Beurteilung der Steuerlogik der ATU
- › Optimierung der Lüfterdrehzahlen der ATU
- › Optimierung der Interaktion zwischen Verglasung und Raumklima hinsichtlich g-Wert und U-Wert
- › Einfluss der Umgebungsklimas auf das Raumklima
- › Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Kabine und Nassraum

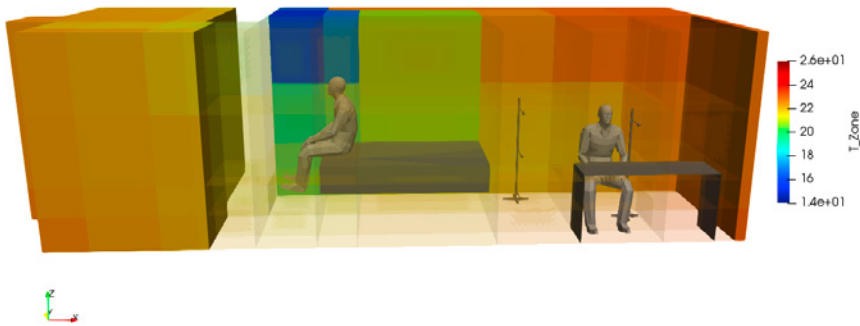


Abb. 24: Falschfarbenmodell der Kabine aus den Simulationsergebnissen des VEPZO abgeleitet. An den beiden dargestellten Positionen des Dummies wurde die lokale thermische Behaglichkeit zusätzlich messtechnisch mit Hilfe des Dressman 3.2 [29] ermittelt

Um die unterschiedlichen Bewertungsschwerpunkte zusammen zu bringen, wurde ein einfach handhabbares virtuelles Entwicklungscockpit (Abb. 25) erstellt. Es erlaubt den variantenübergreifenden Vergleich zwischen neuen und im Projekt erstellten Simulationsvarianten unter den Aspekten der Energie, der Behaglichkeit sowie des Feuchteschutzes.

Variantenvergleich Modulbewertung

Varianten	Notizen	Varianze 1	Varianze 2	Varianze 3
Bewertungskriterien				
Feuchteschutz		0,8	0,5	1,0
Tauwasser		0,5 Basisvariante	0,5 schlechter als Var. 1	1,0 schlechter als Var. 2
Schimmelrisiko an Oberflächen		1,0 Basisvariante	0,5 entspricht Var. 1	1,0 schlechter als Var. 2
Behaglichkeit		0,7	1,0	0,8
PMV		0,6 Basisvariante	0,9 schlechter als Var. 1	0,8 besser als Var. 2
Lokale Dehaglichkeit		0,0 Basisvariante	1,0 entspricht Var. 1	0,0 besser als Var. 2
Energie		0,3	0,3	0,7
Elektrischer Energiebedarf		0,0 Basisvariante	0,7 besser als Var. 1	0,7 entspricht Var. 2
Thermischer Energiebedarf		0,7 Basisvariante	1,0 entspricht Var. 1	0,0 besser als Var. 2
Deckungsgrad		1,0 Basisvariante	1,0 entspricht Var. 1	0,5 besser als Var. 2

Varianten hinzufügen

Letzte Variante löschen

Grafische Bewertungsübersicht

Die Bewertungen sind nach den drei Kategorien **Energie**, **Behaglichkeit** und **Schadenfreiheit** in folgendem Spinnennetzdiagramm dargestellt. Dabei sind die 3 Achsen jeweils test auf 1 normiert. Je größer das Dreieck ist, desto besser wird der betrachtete Fall bewertet. Die "Optimalkabine" weist jeweils einen Achsenwert von 1 auf.



Abb. 25: Exemplarischer Variantenvergleich innerhalb des virtuellen Entwicklungscockpits.

5. ENTWICKLUNGSERGEBNISSE UND AUSBLICK

EcoCab war mit den Aspekten der Nachhaltigkeitsbewertung, Materialentwicklung, Klima- und Elektrotechnik ein thematisch sehr breit aufgestelltes Projekt.

Mit der Definition der nachhaltigen Schiffskabine wurden die theoretischen Grundlagen gelegt, neu entwickelte Lösungen zu analysieren und ökonomische, ökologische und soziale Potentiale aufzuzeigen. Eine Übertragbarkeit des Bewertungsansatzes auf andere maritime Produkte ist gegeben.

Es wurden Materialien untersucht und Alternativen gefunden bzw. entwickelt. Einige Materialien wurden bereits im Demonstrator eingesetzt, was bereits wesentliche Fortschritte bedeutet. Andere Komponenten bedürfen in Zukunft weiterer Entwicklungsarbeit. Teilweise sind noch grundlegende Fragen offen, die in geförderten Projekten erfolgen sollten.

Weiterhin wurden ein Konzept für das dezentrale Klimagerät ATU entwickelt und ein Prototyp gebaut. Die Energieeinsparung bei der Klimatisierung ist sowohl für elektrische als auch für thermische Energie erheblich. Die Klimatisierung bedarf noch weiterer Forschung hinsichtlich der Nachhaltigkeitsaspekte und des Kältesystems.

Die digitalen Analysewerkzeuge wurden an die speziellen Anforderungen der Schiffsklimatisierung angepasst bzw. entsprechend entwickelt.

Die zu erwartenden Erträge der Photovoltaik wurde mittels Simulation prognostiziert. Das entwickelte Werkzeug kann in Zukunft für wirtschaftliche Entscheidungen oder Analysen für ähnliche Fragestellungen genutzt werden. Aspekte, die die Kabine direkt betreffen, sind weitgehend abgearbeitet. Insbesondere die Integration in die Schiffssysteme wird im bereits laufenden Forschungsprojekt SuSy weiter untersucht werden.

Die technischen und methodischen Entwicklungsergebnisse des Projektes EcoCab verändern damit das Verständnis von den zukünftigen Qualitätsanforderungen an die Kabine. Sie nehmen bereits jetzt Einfluss auf den Kabinenbau, so dass die Schiffskabine ihrem zukünftigen Qualitätsverständnis weiter zielführend gerecht werden kann.

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Maritime Forschungsstrategie 2025, MARITIME.green – Umweltschonende maritime Technologien, Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt, April 2018.
- [2] Volker Hauff (Hrsg.): Unsere gemeinsame Zukunft: der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. 1. Auflage. Eggenkamp, S. 46, ISBN 978-3-923166-16-9, Greven 1987.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB): DGNB System – Kriterienkatalog Innenräume. Version 2018. Stuttgart, 2018.
- [4] Braungart, M., McDonough, W., Bollinger, A.: Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. Journal of Cleaner Production 15, S. 1337–1348, 2007.
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN EN ISO 14040:2009 -11 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Beuth Verlag, 2009.
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN EN ISO 14044:2006-10 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [7] International Organization for Standardisation (ISO): ISO 15686-5:2017-07. Hochbau und Bauwerke - Planung der Lebensdauer - Teil 5: Kostenberechnung für die Gesamtlebensdauer. Beuth-Verlag, Berlin, 2017.
- [8] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): VDI 2884. Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Düsseldorf, 2018.
- [9] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): VDI 2067 Blatt 50. Wirtschaftlichkeit von Bauteilen. Düsseldorf, 2018.
- [10] UNEP, Benoît Norris, C., Traverso, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T., Russo Garrido, S., Berger, M., Valdivia, S., Lehmann, A., Finkbeiner, M., Arcese, G. (eds.): Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020. United Nations Environment Programme (UNEP), 2020.
- [11] UNEP, Traverso, M., Valdivia, S., Luthin, A., Roche, L., Arcese, G., Neugebauer, S., Petti, L., D'Eusanio, M., Tragnone, B.M., Mankaa, R., Hanafi, J., Benoît Norris, C., Zamagni, A. (eds.): Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA) 2021. United Nations Environment Programme (UNEP), 2021.
- [12] Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. et al.: ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 22 (2), S. 138–147, 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.

- [13] Jordan, E.: Life Cycle Assessment of a Low Energy Cruise Ship Cabin – Impacts of Decentralized Supply Structures, Masterarbeit. Aachen, nicht veröffentlicht, 2022.
- [14] Europäische Zentralbank (EZB): Statistical Data Warehouse. <https://sdw.ecb.europa.eu/>. Inflation rate (HICP). Letzter Zugriff: September, 2022.
- [15] Big Ranch Media Inc: shipandbunker.com. Bunker prices in Rotterdam for MGO. <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO>. Letzter Zugriff: September 2022.
- [16] Statista: Durchschnittlicher Preis für Methanol auf dem europäischen Markt in den Jahren von 2012 bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/730823/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-methanol-auf-dem-europaeischen-markt/>. Letzter Zugriff: September, 2022.
- [17] Kuckartz, U.: Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung (Grundlagentexte Methoden). Beltz Juventa; 4., überarbeitete Edition, 2018.
- [18] Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung. Springer VS; 2014. Edition, 2014.
- [19] Braungart, M., McDonough, W.: Cradle to cradle - Einfach intelligent produzieren, 5. Edition. ed. Piper ebooks, München, 2014.
- [20] EPEA Nederland BV, BAMB (Buildings as material banks): Deliverable 7, Operational Material Passports, 2019.
- [21] Koninklijke Auping BV 2022 <https://www.auping.com/en/news/royal-auping-and-niagar-achieve-breakthrough-fully-recyclable-mattress>
- [22] Schwager, P.; Gehrke, K.; Vehse, M.: Applicability of Standard Photovoltaic Modules for an Increased Share of Renewable Energies on Board Cruise Ships, 2021 Sixteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), p. 1-5, 2021. doi: 10.1109/EVER52347.2021.9456658.
- [23] Heffner, G; Goldman, C.; Kirby, B.; Kintner-Meyer, M.: Loads Providing Ancillary Services: Review of International Experience, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, Tech. Rep. LBNL-62701, ORNL/TM-2007/060, PNNL-16618, 2007.
- [24] Holbein, B.; Isele, J.; Spatafora, L.; Wiegel, F.; Hagenmeyer, V.: Multivalent Neighborhood heat grid including power-to-heat & shared storage concept, Grand Renewable Energy 2018, Proceedings, Yokohama, Japan, June 2018.
- [25] Faddel, S.; Tian, G., Zhou, Q.: Decentralized Management of Commercial HVAC Systems. *Energies* 2021, 14, 3024. <https://doi.org/10.3390/en14113024>.
- [26] Holbein B. et al: CO2-Kälte auf Schiffen - Herausforderungen und Lösungen aus der Praxis, DKV 2019, DEUTSCHER KAELTE UND KLIMATECHNISCHER VEREIN. ANNUAL MEETING. 45TH 2019. Vol 2, DEUTSCHE KAELTE-UND KLIMATAGUNG 2019 ULM, ISBN: 9781713807209
- [27] Antretter, F.; Pazold, M.: Hygrothermische Gebäudesimulation mit Multi-zonen-Gebäudedurchströmungsmodell. Bauphysik, 2013.

- [28] Norrefedt, V.: VEPZO A locally refined airflow model for confined spaces to use in optimization applications. Dissertation Universität Stuttgart, 2013.
- [29] Park, S., et al.: IBP Mitteilung 571: Objektive Klimakomforbewertung im Fahrzeug mit Dressman 3.2. Fraunhofer IBP, 2021.

PRESEA –

ECHTZEITBASIERTE SEEVERKEHRSVORHERSAGE

AUTOREN

DR. DANA MEISSNER	INSTITUT FÜR SICHERHEITSTECHNIK SCHIFFSSICHERHEIT E.V., ROSTOCK
MARCUS CHRISTOPHER ASTER	INSTITUT FÜR SICHERHEITSTECHNIK SCHIFFSSICHERHEIT E.V., ROSTOCK
DR. CARSTEN HILGENFELD	JAKOTA CRUISE SYSTEMS GMBH (JCS) FLEETMON, ROSTOCK
DIEGO PIEDRA-GARCIA	JAKOTA CRUISE SYSTEMS GMBH (JCS) FLEETMON, ROSTOCK

1. HINTERGRUND

Der Seeverkehr ist das Standbein der globalen Wirtschaft. Im Zuge der weiteren Bewirtschaftung der Meere wird seine Bedeutung in jeder Hinsicht – Transport, Handel, Tourismus, Energiegewinnung – zunehmen. Moderne Technologien ermöglichen bereits die Darstellung von Schiffsbewegungen in Echtzeit auf digitalen Plattformen. Allgemein zugängliche Systeme wie FleetMon, Vesselfinder oder Marinetraffic stellen auf Basis der AIS-Daten der Schiffe entsprechende Übersichten zur Verfügung. Diese Dienste bieten bisher primär die aktuellen Schiffspositionen und ggf. eine Abschätzung erwartbarer Routen in den nächsten Stunden an. Allgemein zugängliche Vorhersagen zum Schiffsverkehrsaufkommen für ein beliebiges Seegebiet für mehrere Tage im Voraus gibt es jedoch nicht. Eine solche Vorhersage des Schiffsverkehrs, beginnend vom gerade gültigen Zeitpunkt bis etwa 14 Tage im Voraus könnte ein wichtiges Hilfsmittel für die gesamte Schifffahrt, für Behörden sowie Sicherheits- und Umweltorganisationen sein. Warenketten könnten besser aufeinander abgestimmt werden. Genannt seien hier beispielhaft Personalplanungen für Lotsendienste, aber auch Bunkervorräte für Schiffe, Kühlkapazitäten und Gefahrgutlagerplätze. Zudem kann es auch von sicherheits- und umweltpolitischer Bedeutung sein, Schiffsverkehrsdichten pro Zeiteinheit und Meeresgebiet vorausschauend darzustellen, z. B. wenn es um die Vorhaltung von Versorgungseinrichtungen und Sicherheitsmaßnahmen geht. Insbesondere aber auch nach Havarien, wie z. B. dem Unfall der Ever-Given im Suez-Kanal 2021, wäre die Seeverkehrsvorhersage ein wichtiges Tool für Reedereien, um z. B. Wartezeiten abzuschätzen oder Alternativrouten zu planen.

Projektziel war entsprechend die Entwicklung eines Demonstratormoduls zur echtzeitbasierten Seeverkehrsvorhersage bis etwa 14 Tage im Voraus. Die bessere Interpretation der in den AIS-Daten hinterlegten Zielhäfen der Schiffe und die daraus folgende Implementierung eines selbstlernenden Algorithmus waren wichtige im Projekt zu lösenden

Fragestellungen. Zudem sollten Methoden zur Erkennung von Linienverkehren sowie Routing-Algorithmen zur zeitnahen Anpassung an unerwartete Ereignisse, wie z. B. Wetter oder Schiffsunfälle in das Vorhersagesystem entwickelt werden.

2. BEDARFSERMITTLUNG UND NUTZERANALYSE

Innerhalb von Interviews wurden zunächst die von den verschiedenen potenziellen Nutzern (Reedereien, Behörden, Logistikunternehmen, Versicherungen, ...) gewünschten Funktionalitäten für das zu entwickelnde System erfasst und bewertet. Es ergaben sich wichtige Anwendungsszenarien, die teilweise im Vorfeld des Projektes noch nicht absehbar waren. Zum Beispiel könnte es im Zuge des geplanten Baus und Betriebs von LNG-Terminals in verschiedenen Häfen wichtig sein zu wissen, wann in den nächsten Tagen besonders viele Schiffe mit Gefahrgut zu erwarten sind, da Gefahrgutverladungen und LNG-Bunkervorgänge möglicherweise nicht zeitlich parallel durchgeführt werden können. Das Vorhersagesystem könnte hier eine effektive Planung unterstützen.

Tab. 1: erfragte mögliche Anwendungsszenarien für eine echtzeitbasierte Seeverkehrsvorhersage

Nutzungsszenario	Filterung der Daten nach...
Verladekapazitäten planen, z. B. Kohle oder Getreide	Art und Menge der Ladung
Betrieb von LNG Bunkerstationen (Einstellung des Betriebes bei Verladung von Gefahrgut, Vorbeifahrt von bestimmten Gefahrgutschiffen)	Schiffen mit Gefahrgut, Art des Gefahrgutes
Effektivere Nutzung, z. B. von Schleusen, Kanälen	Länge / Breite / Tiefgang
Planung von Personal (Lotsen)	lotsenpflichtigen Schiffen
Effektivere Routenplanung	Anzahl der Schiffe vor Engstellen (z. B. NOK) Status Belegung von Ankerplätzen
Planung von Gesundheitsschutzmaßnahmen (z. B. nach Fukushima – Radioaktivität, Corona- Virus)	Fahrgastschiffen, Abgangshafen, Zwischenhäfen sowie Zielhafen
Planung von Ver- und Entsorgungskapazitäten im Hafen	Schiffsgröße, Bunkerkapazitäten, Art des Treibstoffes
Vorbeugende Sicherheitsmaßnahmen, z. B. Positionierung von Notschleppern bei zu erwartendem hohem Verkehrsaufkommen	Schiffen mit Gefahrgut, Öltankschiffe, Gastankschiffe
Umweltschutzmaßnahmen, z. B. Begrenzung landgehender Passagiere in arktischen Regionen	Fahrgastschiffen mit Zielhäfen in arktischen Regionen

3. SELBSTLERNENDER ALGORITHMUS ZUR NEXT-PORT ZIELBESTIMMUNG

Für die Angabe des Abgangs- und Zielhafens im AIS-System empfiehlt die IMO die Verwendung des so genannten UN/LOCODEs, der von einer Unterorganisation der UN für infrastrukturrelevante Orte auf der Welt festgelegt wird. Dieser besteht typischerweise aus fünf Buchstaben. Die ersten beiden Buchstaben sind der Ländercode. Der Ort innerhalb des Landes wird durch drei weitere Buchstaben angegeben. Ein derart codierter Abgangs- bzw. Zielhafen ist durch eine Software leicht auszuwerten.

Tab. 2: UN/LOCODE Beispiele

LOCODE	Land	Ort
AT VIE	Österreich	Wien (engl. Vienna, franz. Vienne, span. Viena)
BE BRU	Belgien	Brussel (engl. Brussels, franz. Bruxelles, deutsch Brüssel, ...)
DE RSK	Deutschland	Rostock
SE BAS	Schweden	Bastad (schwedisch: Båstad)
SE GOT	Schweden	Goteborg (schwedisch: Göteborg, engl. Gothenburg)

Die Eingabe an Bord erfolgt händisch durch die Besatzung, dabei kommt es zu Fehlern, was die softwaretechnische Ermittlung des tatsächlich gemeinten Zielhafens verhindert und damit eine Seeverkehrsvorhersage erschwert. Eine Hauptaufgabe des Projektes bestand daher in der Schaffung sinnvoller Algorithmen zur Zuordnung von falsch geschriebenen Codes zu den tatsächlich gemeinten. Basis für diese Arbeit war eine Datei von JAKOTA Cruise Systems (JCS) mit über 60.000 nicht zuordenbaren Zieleingaben. In dieser Ursprungsdatei wurde zunächst eine Häufigkeitsanalyse vorgenommen, um die auszuwertenden Daten einzugrenzen. Für die weitere Bearbeitung wurden nur die Eingaben berücksichtigt, welche fünf Mal oder öfter vorkamen. Bei den verbleibenden ca. 15.000 erfolgte als nächster Schritt eine Abtrennung von „Zieleingaben“ die gar keine Häfen beschreiben, sondern auf bestimmte Situationen an Bord hinweisen. Es zeigte sich, dass diese Hinweise, wie z. B. „armed guards onboard“ für bestimmte verknüpfte Auswertungen auch wichtig sein können, sie wurden daher identifiziert und in eine separate Datenbank aufgenommen. Die auszuwertenden Datensätze konnten auf ca. 7500 reduziert werden, die sich auf ca. 730 verschiedene Falschschreibungen verteilten. Diese wurden u. a. anhand historischer Routen-Daten der Schiffe, die diese falschen Angaben ins AIS eingegeben hatten, den tatsächlich gemeinten Häfen zugeordnet. Die letztendlich entstandenen „Übersetzungstabellen“ wurde dem Projektpartner JCS zur Integration in den selbstlernenden Algorithmus zur Verfügung gestellt. Dieser kann dadurch Rückschlüsse auf typische Fehler ziehen. So wird z. B. für den Ländercode für Deutschland häufig GE (für Germany) statt korrekt DE verwendet. Da GE korrekt für Georgien steht, das kaum Häfen hat, ist hier in Zukunft eine automatische Korrektur durch den Algorithmus möglich.

Auch wenn es im AIS gewünscht ist, den nächsten Hafen mittels seines LOCODEs anzugeben, geben Schiffsbesatzungen häufig den Klarnamen des Hafens als nächstes Ziel ein. Da es weltweit verschiedenste Häfen mit dem gleichen Namen gibt, wie z.B. Vancouver, Portland, Sydney oder rund 80 andere, kann es dann zu Falschinterpretationen kommen. Um diese eingrenzen zu können, wurde eine Auflistung von gleichnamigen Häfen erstellt. Im Weiteren wurde die jeweilige Lage und die Besonderheiten der Häfen überprüft, z.B. ob es sich um einen See- oder Binnenhafen handelt. Außerdem wurden die jeweils vorhandenen Umschlagsmöglichkeiten recherchiert und nach Ladungstypen unterteilt, um zu entscheiden, ob dort z.B. Kreuzfahrtschiffe, Containerschiffe oder Tankschiffe anlegen können. Zudem wurde auf historische Daten zurückgegriffen: Wurden in der Vergangenheit Massengutschiffe in dem jeweiligen Hafen be- und entladen, so ist davon auszugehen, dass dieser Hafen Verlademöglichkeiten für diesen Schiffstyp hat. Auf diese Weise kann der Algorithmus durch eine Verknüpfung des Schiffstyps mit den Eigenschaften der verschiedenen möglichen Zielhäfen eine plausible Auswahl treffen. Beispiel: ein General Cargo Schiff gibt im AIS „Aberdeen“ als nächsten Hafen an. Diesen Hafen gibt es in den USA sowie in England. Gemäß der Abfertigungsmöglichkeiten der beiden Häfen ist es sehr wahrscheinlich, dass das General Cargo Schiff nach Aberdeen in den USA fahren wird, da in England keine Abfertigungsmöglichkeit für General Cargo besteht.

Tab. 3: Zuordnung von falsch geschriebenen Zielhafen-Eingaben zu den tatsächlich korrekten LOCODEs

Eingabe im AIS Gerät (Falsch)	Gemeinter Ort	Richtiger LOCODE
AEPB	Singapore - Eastern Petroleum B Anchorage	SGSIN
AUS ADELAIDE	Adelaide	AUPAE
DBCT AUS	Dalrymple Bay Coal Terminal Hay Point	AUHPT
BULLENBAY OPL	Bullen Baai - OPL = Off Port Limits	CWBUB
BYQ GANG	Bayuquan	CNBAY
FOS FRANCE	Fossumer	FRFOS
ES ALG NG ESC	Escravos Oil Terminal	NGESC
ILHA BELA	Sao Sebastiao - Ihlabela is across Sao Sebastiao	BRSSO
JABAL ALI	Dubai (Jebel Ali)	AEJEA
GEROS	Rostock	DERSK

4. KLASSIFIZIERUNG VON SCHIFFSTYPEN UND EINFLUSS VON WETTER-VERHÄLTNISSEN

Statische und dynamische Einflussfaktoren wirken sich auf verschiedene Schiffe unterschiedlich aus. Ein großes Containerschiff wird bestimmte Wellenhöhen und Windstärken noch bewältigen können, ein Kreuzfahrtschiff würde gleiche Wetterbedingungen zum Wohl der Passagiere vermutlich meiden und eine andere Route nehmen oder in einem Hafen abwettern. Aber auch Antriebsart oder die transportierte Ladung können Einfluss auf die zu wählende Schiffsroute haben. Dementsprechend muss der Schiffstyp bei der Seeverkehrsvorhersage berücksichtigt werden. Im Projekt wurde daher eine detaillierte Gliederung für Schiffstypen erarbeitet. Zudem wurden weitere zu berücksichtigende Faktoren für eine Klassifizierung von Schiffen erfasst, wie z. B. der verwendete Treibstoff.

Nachfolgender Arbeitspunkt war die Entwicklung möglicher Modelle zur Implementierung von Algorithmen für ein Wetter-Routing. Der favorisierte Ansatz berücksichtigt dabei die Kombination von schiffsspezifischen Aspekten (Stabilitätskategorien) mit Grundfaktoren des Seegebietes (Knoten-Grundwerte) und gewichteten Wetterbedingungen (Wetterfaktoren).

Es wurden zunächst drei Stabilitätskategorien für Schiffe definiert, die sich aus dem Verhältnis von Länge zu Breite und ggf. noch der Höhe ergeben.



Abb. 1: vereinfachte Darstellung der Stabilitätskategorien: 1 gut, 2 mittel, 3 schlecht

Das durch JCS verwendete Routingnetz besteht aus Kanten, die sich in Knoten schneiden. Die Knoten können für die Berechnung einer wetterabhängigen Fahrtroute mit bestimmten Grundwerten belegt werden, die sich aus den an den jeweiligen Knoten vorliegenden Bedingungen ergeben (Grundbelastung des Knotens gemäß dortiger Wassertiefe, Strömung, Durchschneitswelle). Schließlich kann ein Wetterfaktor definiert werden, der sich z. B. aus der Wellenhöhe, der Windgeschwindigkeit und der Niederschlagsmenge ergibt.

Auf dieser Basis können „Befahrbarkeitswerte“ ermittelt werden, die sich aus der Multiplikation von Stabilitätskategorie x Knotengrundwert x Wetterfaktor ergeben. Ab einem festzulegenden Grenzwert (z. B. 16) kann dann das Seegebiet für das jeweilige Schiff als nicht mehr befahrbar definiert werden, so dass die Route sich zwangsläufig verändern muss.

Tab. 4: Ermittlung von Befahrbarkeitswerten aus dem Produkt von Stabilitätskategorie, Knoten-Grundwert und Wetterfaktor

Stabilitäts- kategorie	Knoten Grundwert	Wetter 1 – Faktor 1	Wetter 2 – Faktor 2	Wetter 3 – Faktor 3	Wetter 4 – Faktor 4
Sx	KGy	Sx * KGy * 1	Sx * KGy * 2	Sx * KGy * 3	Sx * KGy * 4
1	1	1	2	3	4
1	2	2	4	6	8
1	3	3	6	9	12
2	1	2	4	6	8
2	2	4	8	12	16
2	3	6	12	18	24
3	1	3	6	9	12
3	2	6	12	18	24
3	3	9	18	27	36

Zur Definition der Wetterfaktoren wurden historische Fahrtparameter ausgewählter Schiffe mit den dazu übermittelten Wetterdaten (Luftdruck, Wellenhöhe, Windgeschwindigkeit) in Bezug gesetzt, um festzustellen, inwieweit sich die Schiffsgeschwindigkeit tatsächlich mit den Wetterdaten korrelieren lässt. Bei ersten Beispiel-Anwendungen des Modells zeigten sich Herausforderungen, die vor Implementierung in den Demonstrator weiterführend zu bedenken sind, u. a.:

- › Die Zuordnung eines Schiffes zu einer Stabilitätskategorie allein aus seinen Abmaßen ist unzureichend. Es spielen z.B. auch der Beladungszustand oder die Rumpfform eine wichtige Rolle für die Stabilität. Diese Daten ergeben sich jedoch nicht aus den AIS-Daten und sind somit nicht automatisch generierbar.
- › Es erfolgt keine zuverlässige permanente Übermittlung der benötigten Wetterdaten. Daraus ergibt sich die Frage, welche Daten der Routing-Algorithmus für das Wetter annehmen soll, wenn die Daten fehlen.
- › Die Knoten des Routingnetzes sind gerade auf hoher See sehr weit auseinander. Wetterdaten, insbesondere Vorhersage-Daten können sich daher auf dem (langen) Weg von einem Knoten zum anderen bereits deutlich ändern.

5. KONZEPTION UND UMSETZUNG DES DEMONSTRATORS

Ein Großteil der Algorithmestests wurde im AWS (Amazon-Web-Service | Clouddienst) durchgeführt, da sehr kurzfristig sehr viel Rechenleistung bereitgestellt werden muss. Der Kern der Backend-Entwicklung ist eine Bereitstellung eines Rechnerverbunds (Cluster) im AWS. Hier wurde sich für eine Docker-Cluster-Technologiekombination entschieden. Docker ist ein Softwarepaket, welches ermöglicht, in sich geschlossene Programmteile zu

kapseln und auf virtuellen Maschinen zu installieren. Der große Vorteil ist, dass in einem Docker kein Betriebssystem benötigt wird - das System läuft unabhängig als eine Einheit. Damit wurde erreicht, dass sehr schnell viele virtuelle Rechner im AWS parallel betrieben werden können. Mit dieser Cluster-Lösung wurde eine schnelle Skalierbarkeit je nach Bedarf gewährleistet. Der entwickelte Demonstrator ermittelt aus den historischen Daten und weiteren im Projekt erarbeiteten Informationen die möglichen Routen eines Schiffes und versieht sie mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. In Abbildung 2 ist für ein ausgewähltes Schiff dargestellt, welche Routen denkbar sind.

Während der Entwicklung des Demonstrators wurden mehrere Belastungstests durchgeführt. Es wurde zudem ein Verfahren entwickelt, welches die Aktualisierung des implementierten Modells durch das Trainieren eines separaten, unabhängigen Teilmodells ermöglicht. Dieser Schritt wurde alle vier Wochen vorgenommen, um das Modell an den aktuellen Schiffsverkehr anzugleichen. Dabei wurden faktisch zwei logische AWS-Datenbanken-Gruppen genutzt. Die erste Gruppe gestattet die Vorhersage der nächsten Häfen für ein spezifiziertes Schiff. Zur Gewährleistung akzeptabler Latenzen werden hierfür verschiedene Datenbank-Instanzen, die die einströmende Anfragelast untereinander aufteilen, benötigt. In der zweiten Gruppe werden die im AWS ermittelten Portcalls nach mehreren Preprocessing-Schritten importiert und aus diesem die globale Markow-Kette bestimmt. Um die Ergebnisse zu prüfen und die Wirkung von kleineren Änderungen nachvollziehen zu können, wurde ein Tableau-Dashboard entwickelt, mit dem für beliebige Schiffe und Konstellationen die Vorhersage geprüft werden kann. Neben Tableau wurde hierfür das Open-Source Framework Streamlit (www.streamlit.io) erstmalig bei JCS eingeführt. Dieses Tool ermöglichte es, effizient Daten aus API-Antworten oder Datenbanken visuell darzustellen und somit eine schnelle Ergebnisvalidierung zu ermöglichen.

Bei der Entwicklung des PRESEA-Demonstrators wurde erstmalig bei JCS | FleetMon das what3words-System eingesetzt. Dabei wird ein beliebiger Standort auf der Erde mittels dreier Wörter und nicht mit LAT/LONG Koordinaten beschrieben. Bei der Implementierung der einzelnen Untersuchungsbereiche („predicted areas“) hat man sich für Voronoi-Diagramme entschieden. Dieses sind Flächen, die die gesamte Erde bedecken aber pro „predicted area“ nur genau einen Routing-Punkt enthalten.

Unter Berücksichtigung des eingegangenen Feedbacks der Partner hat sich ergeben, dass die angedachte Echtzeitdarstellung eines Schiffes mit Kartenansicht für den avisierten Endanwender einen großen Mehrwert darstellt und daher von JCS weiterentwickelt wird. Gemäß dem Motto “What we track, we can predict“ war die Zielstellung, die nächsten Ziele von Schiffen transparent, plausibel und nachvollziehbar darzustellen und eine Vergleichbarkeit zwischen den gemeldeten Next-Port aus AIS und berechneten Werten aus dem Forschungsprojekt zu schaffen.

Test Voyage Prediction

Prediction Config

Port 0
58370 - +

Port -1
58370 - +

Port -2
58370 - +

Port -3
58370 - +

Port -4
58370 - +

AIS Destination
[Empty field]

Prediction Result

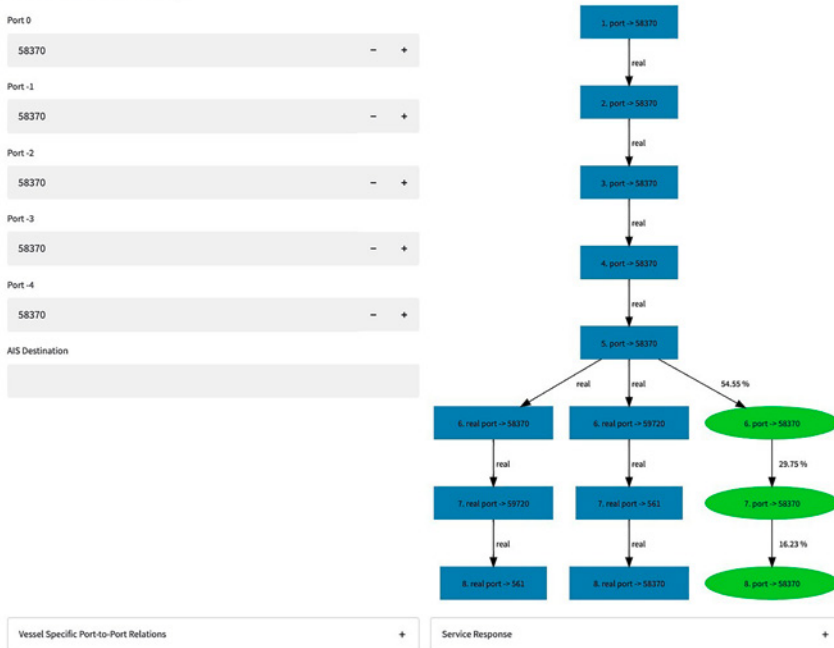


Abb. 2: Streamlit-Visualisierung des Next-Port-Predictors

Für die Weiterentwicklung des Demonstrators bis zur Marktreife bzw. Gebrauchstauglichkeit müssen noch diverse Optimierungen des Moduls durchgeführt werden und weitere Tests mit Probanden und gezielten Anwendungsfällen erfolgen. Die Funktionsfähigkeit der Vorgehensweise konnte nachgewiesen werden, die bisherige Entwicklungsarbeit wird im Detail analysiert und ein marktfähiger Ansatz weiterentwickelt.

Weiterführende Forschungsarbeiten in Bezug auf eine echtzeitbasierte Seeverkehrsvorhersage sind vor allem im Zusammenhang mit einer intuitiv bedienbaren und international standardisierten Digitalisierung des Seeverkehrs notwendig. Hier besteht in der Seefahrt als konservative Branche generell deutlicher Nachholbedarf. Das Projekt PRESEA kann als wichtiger Schritt auf diesem Weg betrachtet werden.

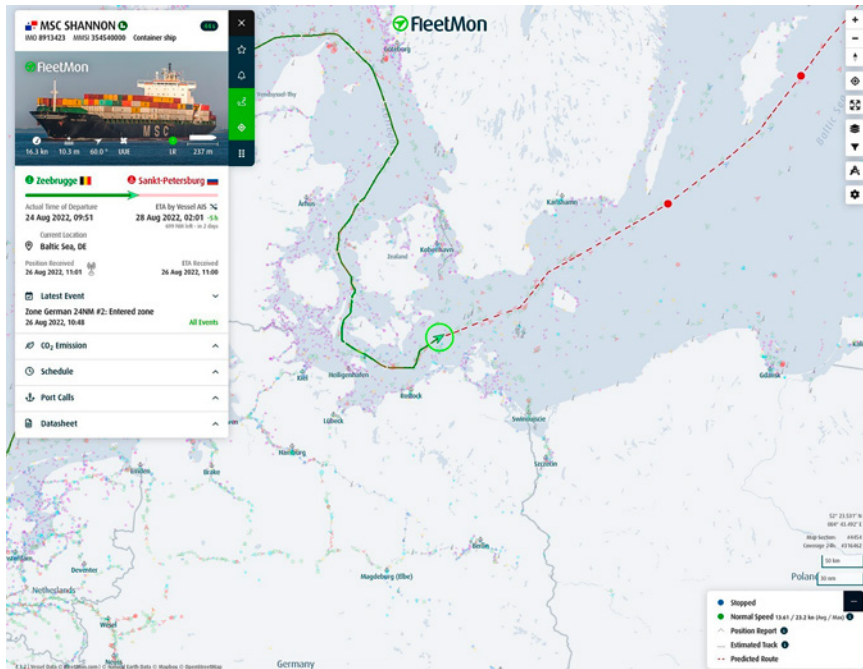


Abb. 3: Last Event und Next Port Darstellung

6. DANKSAGUNG

Das Konsortium dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die finanzielle Unterstützung sowie dem Projektträger Jülich für die Begleitung des Forschungsvorhabens.

DNH

ENTWICKLUNG EINES INNOVATIVEN SYSTEMS FÜR DRUCKNEUTRALE HOCH-
SPANNUNGSANLAGEN UNTER WASSER OHNE MECHANISCHE SCHALTKONTAKTE

AUTOREN

MANUEL HÜBNER	FormLED GmbH, Karlsruhe
GERHARD KÖRNER	FormLED GmbH, Karlsruhe
STEFAN ESSIG	FormLED GmbH, Karlsruhe
AHMET F. KILINC	HVP High Voltage Products GmbH, Martinsried
FELIX HÖHNLE	HVP High Voltage Products GmbH, Martinsried
HIKMET GUENEGRI	HVP High Voltage Products GmbH, Martinsried
ANNA TOK	Hochschule Rhein Main, Rüsselsheim
WIDA SAYAR	Hochschule Rhein Main, Rüsselsheim
DAVID BRANDT	Hochschule Rhein Main, Rüsselsheim
PROF. WILFRIED ATTENBERGER	Hochschule Rhein Main, Rüsselsheim
DR. YVONNE HABA	Meerestechnik, Universität Rostock
DR. SARAVANA K. ARUMUGAM	Meerestechnik, Universität Rostock
SASCHA KROHMANN	Meerestechnik, Universität Rostock
PROF. SASCHA KOSLECK	Meerestechnik, Universität Rostock
ROGHIEH SARDAST	Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Universität Rostock
MARIUS BEKKER	Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Universität Rostock
PETRUS PIETERSE	Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Universität Rostock
PROF. DIRK UHRLANDT	Hochspannungs- und Hochstromtechnik, Universität Rostock

1. MOTIVATION UND STAND DER FORSCHUNG

Im Bereich der Tiefseetechnologie besteht ein Bedarf an Systemen höherer Leistungsdichte mit hinreichender Flexibilität. Einen wichtigen Faktor stellen die Verkabelungssysteme dar, da die notwendigen Kabelquerschnitte für höhere Leistungen eine erhöhte Masse, eine geringere Flexibilität und einen erhöhten Strömungswiderstand der Verkabelungen nach sich ziehen. Mit Erhöhung der Spannung lassen sich die Kabelquerschnitte ohne Erhöhung der Leitungsverluste reduzieren, wobei bisherige Anwendungen auf die untere Mittelspannung beschränkt sind. Trends zeigen sich unter anderem bei der

stationären Meeresbodenbeobachtung. So wird im kabelgebundenen Meeresboden-observatorium „Neptun“ vor der Küste Kanadas in Tiefen bis 2660m ein 10kV-DC-Kabelsystem zur Versorgung eingesetzt [1]. Beim Einsatz unbemannter ferngesteuerter Fahrzeuge (English: remote operated vehicle ROV) für Reparaturen, Inspektionen und Erkundungen wurde der Einsatz bei bis zu 6000m Tiefe dokumentiert [2]. In einem typischen Beispiel wird eine feststehende Zwischenstation mit 20kV AC versorgt, an welche ein ROV mit einem flexiblen Leistungskabel von 50m Länge angeschlossen ist [3]. Das Gerät „OFOBS“ für den Einsatz in bis zu 6000m Tiefe wird mit einem 600V Leistungskabel zusammen mit Glasfaser-Kommunikationskabeln versorgt [4]. Im Allgemeinen werden Konverter und Verteilungskomponenten in Druckbehältern angeordnet, wie etwa in dem in [5] beschriebenen Observatorium.

Neben dem Einsatz hoher Spannungen kann eine druckneutrale Bauweise erheblich zum Gewichtsverlust und einer höheren Flexibilität der Energieversorgungssysteme beitragen. In dieser Bauweise wird auf Druckkammern vollständig verzichtet, und alle Komponenten werden in geeigneter Weise in einen isolierenden Verguss eingebettet, der dem Druck und dem Meerwasser ausgesetzt ist. Hierzu wurden bereits vom BMWi geförderte Forschungsvorarbeiten im Niederspannungsbereich bearbeitet [6, 7]. Für die Mittelspannungsebene erfolgten erste experimentelle Untersuchungen u.a. zu einem Hochspannungsanschlusskabel bis 20kV [8]. Entscheidend für druckneutrale Bauweisen ist das Verhalten der für den druckneutralen Verguss eingesetzten isolierenden Materialien, die in Kontakt mit dem Meerwasser kommen. Studien zur Wassereindringung und Wassersättigung beschränken sich bisher aber auf spezifische Materialien [9]. Nur sehr wenige Untersuchungen befassten sich mit der Wirkung erhöhten Drucks [10]. Eine systematische Untersuchung der Wirkung von Druck und Wassersättigung, insbesondere auf druckneutral vergossene Hochspannungskomponenten, ist bisher ausstehend.

Die Zuverlässigkeit von Hochspannungsanlagen unter und über Wasser lässt sich durch einen Verzicht auf mechanische Schaltelemente erheblich erhöhen. Eine druckkompensierte Ausführung von Schaltkontakten ist nur unter Öl möglich, und diese unterliegen dem Verschleiß der Ölfüllung durch Brandspuren bei der Funkenlöschung sowie einer Verminderung der Isolierfestigkeit durch Alterung. Für den landgestützten Einsatz unter Normaldruck sind erste Hochspannungsanlagen ohne mechanische Schaltkontakte [11] bzw. Halbleiterschalter für Spannungen bis zu mehreren 100kV [12] bereits bekannt. Dazu werden einzelne Schalter (MOSFET oder IGBT) in Serie gleichzeitig ein- und ausgeschaltet. Für hohe Eingangsspannungen und insbesondere Eingangs-Gleichspannungen sind Schaltnetzteile erforderlich, die sich zum Beispiel mit Multilevel-Wandlern umsetzen lassen [13]. Eine Umsetzung solcher Wandler in druckneutraler Bauweise und die Auswirkungen von Druck und Wassersättigung sind bisher nicht bekannt.

Ziel des Vorhabens DNH ist deshalb die Entwicklung und Erarbeitung industrieller Grundlagen für druckneutrale Hochspannungsanlagen zur effizienten Energieversorgung von Tiefseetechnologien für beliebige Tauchtiefen. Dabei werden im aktuellen Projekt Spannungen bis 60kV und ein Testdruck bis zu 600bar angestrebt. Wartungsarme und

kosteneffiziente Lösungen sollen auf Basis von druckneutral vergossenen Baugruppen aus verschleißfreier Halbleiter-Hochspannungsschaltungstechnik ohne mechanische Schaltkontakte vorgeschlagen werden. Hierzu müssen verwendbare Materialien, Vergussysteme, Bauelemente und Halbleiterbaugruppen für druckneutrale Hochspannungssysteme ermittelt und in Hinblick auf das Eindringen von Wasser und die Einwirkung von hohem Druck und deren Auswirkungen auf die Materialeigenschaften bewertet werden. Ziel ist es außerdem, die Machbarkeit einer Hochspannungsenergieversorgung anhand eines wartungsarmen Demonstrators inklusive seiner Fernüberwachung nachzuweisen.

Im Projekt wurden unter dieser Zielstellung fünf Schwerpunktthemen bearbeitet, über die im Folgenden berichtet wird: die Konzeption eines Demonstrators (siehe Abschnitt 2), die Untersuchungen von Vergussystemen und Leiterplattendesign sowie des Verhaltens von Bauelementen in druckneutralen Hochspannungskomponenten (siehe Abschnitte 3 und 4) und die Erarbeitung von Hoch- und Niederspannungskomponenten des Demonstrators sowie sein Aufbau und Test (siehe Abschnitte 5 und 6).

2. KONZEPT EINES DEMONSTRATORS FÜR EINE DRUCKNEUTRALE HOCHSPANNUNGSVERSORGUNG

Um die Funktionsfähigkeit eines Hochspannungsversorgungssystems in druckneutraler Bauweise im Labor entsprechend einem TRL 4 nachzuweisen, wurde ein Demonstrationsystem konzipiert. Die Demonstration soll in einem vorhandenen Druckwassertank mit einem Testdruck bis zu 600bar erfolgen. Da dieser eine Hochspannungszuführung von außen nicht gestattet, wurde von Beginn an ein autonomes System angestrebt, in dem die Hochspannung selbst erzeugt und die Energie zwischen einem Niederspannungsteil und einer Hochspannungsteststrecke im Kreis geführt wird. Das Demonstrator-konzept ist in Abbildung 1 illustriert.

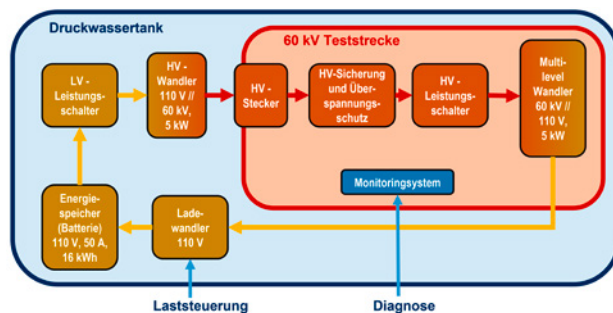


Abb. 1: Schema des Demonstrators

Als Energiequelle im Niederspannungsteil dient ein Batteriesystem mit der Kapazität von 16 kWh und einer Ausgangsspannung von 110 V Gleichspannung. Diese speist über einen Leistungsschalter einen Energiewandler auf 60 kV Gleichspannung mit einer Leistung von 5 kW, welcher den Eingangsteil der Hochspannungsteststrecke bildet. Über Steckverbindungen werden Sicherungs- und Schaltelemente verbunden, wobei

insbesondere der Hochspannungsleistungsschalter ohne mechanische Schaltkontakte vorgesehen ist. Am Ende der Teststrecke dient ein Multilevel-Wandler als Last, der die Hochspannung zurück zu 110V Gleichspannung wandelt. Über einen Ladewandler wird die Energie zurück an das Batteriesystem geführt, sodass trotz Verlusten in den Komponenten ein Langzeitbetrieb über mehrere Stunden realisiert werden kann.

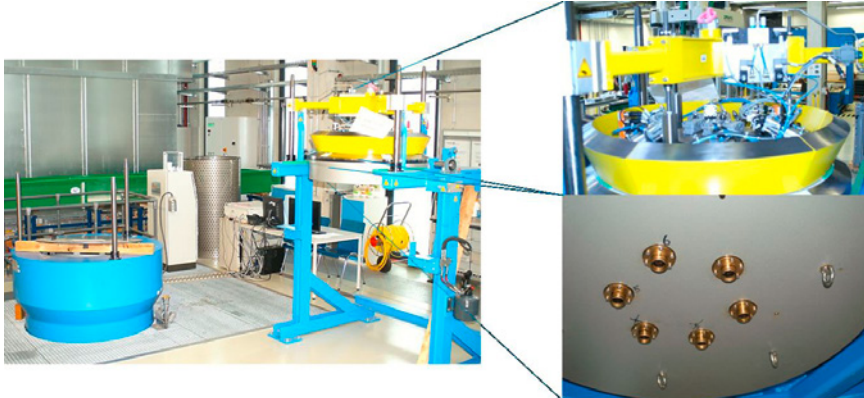


Abb. 2: Drucktank des Lehrstuhls für Meerestechnik der Universität Rostock – links der Öffnungsbereich des in den Boden versenkten Tanks, rechts der Deckel mit Halterung.

Weitere wesentliche Komponenten dienen der Steuerung und des Monitorings des Betriebs der Hoch- und Niederspannungsmodule. Auch hierfür wurde ein spezielles Konzept erarbeitet, bei dem die Signalübertragung zwischen den Modulen über Lichtwellenleiter erfolgt, um die Spannungsebenen zu entkoppeln. Die Steuer- und Monitoring-Einheiten im Demonstrator sind über Signalleitungen durch den Deckel des Hochdrucktanks mit einer externen PC-basierten Steuerung verbunden. Abbildung 2 zeigt den zur Verfügung stehenden Drucktank mit einem Tankdurchmesser von ca. 1 m und 1,5m nutzbarer Innenhöhe. In Abbildung 3 ist illustriert, wie die Hoch- und Niederspannungsmodule in einem Rahmen des Demonstrators angeordnet werden.

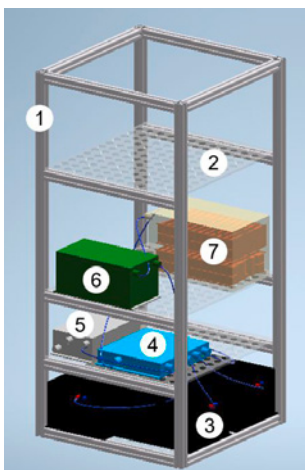


Abb. 3:
Mechanischer Aufbau des Demonstrators
1) Stahlrahmenkonstruktion,
2) Polykarbonateinlagen,
3) Batteriestack,
4) Niederspannungsverteilung,
5) Batterieladegerät (Ladewandler),
6) Hochspannungswandler,
7) Multilevel-Wandler.

3. VERGUSSSYSTEME UND LEITERPLATTENDESIGN FÜR DRUCKNEUTRALE HOCHSPANNUNGSKOMPONENTEN

In den angestrebten Komponenten in druckneutraler Bauweise sind die Vergussysteme und Isolationsmaterialien der Wassersättigung und dem Wasserdruck ausgesetzt. Hierfür sind angepasste Materialien erforderlich, deren Eigenschaften auch das Design der Komponenten bestimmen. Wichtige Randbedingungen stellen dabei die Isolationsfestigkeit unter Wassereinfluss und die resultierenden notwendigen Isolationsabstände etwa im Leiterplattendesign dar. Diese werden zusätzlich durch die Vergusstechnik beeinflusst, bei der eine Ausbildung von Poren verhindert werden muss. Poren führen unter Hochspannung zur Ausbildung von Teilentladungen, die das Isolationsmaterial schädigen und die Lebensdauer der Komponenten maßgeblich reduzieren können.

Zur Untersuchung der entsprechenden Eigenschaften wurden zunächst geeignete Testmethoden erarbeitet. Diese umfassten zum einen zuverlässige praxisnahe Techniken für die Herstellung geeigneter Vergüsse u.a. mit Vakuumkammern zur Ausgasung vor der Aushärtung. Zum anderen war neben dem vorhandenen großen Drucktank der Aufbau eines kleinen Drucktanks für den Test von Materialmustern, Bauelementen und kleinen Komponenten erforderlich. Eine Herausforderung bestand insbesondere in der geeigneten Zuführung hoher Spannung in den Drucktank, da die hochspannungsfesten Durchführungen der Druckdifferenz zum Außendruck widerstehen müssen. Hierfür erfolgten spezielle Entwicklungen.

Weiterhin wurden Testelektrodensysteme und Prüfanordnungen entwickelt und gebaut, die sich als notwendig für die elektrischen Prüfungen, hauptsächlich Durchschlagprüfungen und Impedanzanalysen, erwiesen. Abbildung 4 zeigt Anordnungen für Tests der Eigenschaften von Isolationsmaterialien in Form von flachen Mustern in einer abgeschirmten Box bzw. zwischen Prüfelektroden.

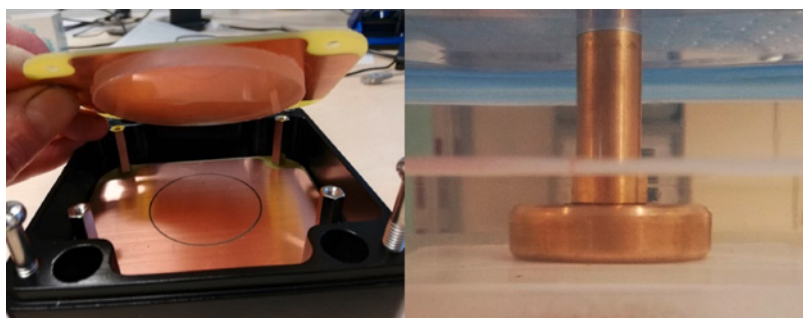


Abb. 4: Elektrodenaufbau für den Test von flachen Isolationsmustern in einer abgeschirmten Messbox für Impedanzmessungen (links) und für Hochspannungsprüfungen (rechts).

Exemplarisch für den Aufbau von Modellsystemen ist in Abbildung 5 eine Leiterplatten-Spaltanordnung für Durchschlagtests dargestellt. Die elektrischen Messungen erfolgten jeweils unter Einsatz geeigneter Spannungsquellen bis 100 kV sowie von Impedanz- und Teilentladungsmesssystemen.

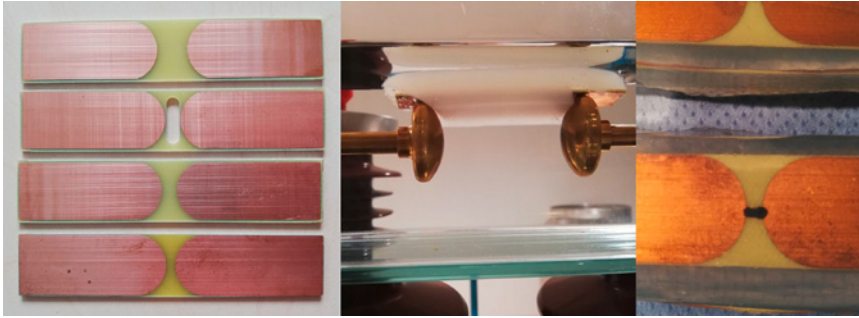


Abb. 5: Leiterplattentestmuster mit den Abständen 3, 5 und 10 mm sowie 3 mm mit einem Schlitz (links), Anordnung zur Messung von Durchschlagsspannungen an den vergossenen Mustern (Mitte) und Muster nach erfolgtem Durchschlag (rechts).

Als Vergussmaterial wurde insbesondere Silikongel in verschiedenen Mischungen untersucht, welches zum Vergießen der Leistungs- und Hochspannungsschaltkreise des Demonstrators zum Einsatz kommt. Silikongel zeigte im Trockenzustand eine erhöhte Durchschlagsspannung bis 35 kV bei 4 mm Dicke im Vergleich zu Silikonöl oder Luft. Jedoch wurde für eine in Meerwasser gesättigte Silikongelprobe eine verringerte Durchschlagsspannung von bis zu 22 kV gemessen.

An in Abbildung 5 gezeigten Leiterplattenmustern wurden Durchschlagsspannungen zwischen 11 und 50 kV ermittelt. Vergossene Proben wurden jeweils einer Sättigung zum einen in deionisiertem Wasser und zum anderen in technischem Meerwasser unterzogen. Abbildung 6 verdeutlicht als wichtiges Ergebnis die Absenkung der Durchschlagsspannung mit der Zeit, in der sich die Proben durch Diffusionsprozesse mit Wasser sättigen. Die Einführung von Schlitz in das Leiterplattenmaterial hat geringe Auswirkungen auf die Durchschlagfestigkeit, kann jedoch das Risiko der Kriechstrombildung verringern. Von Bedeutung für die Durchschlagfestigkeit ist außerdem eine gute Anbindung des Silikons an der Ober- und Unterseite der Leiterplatten.

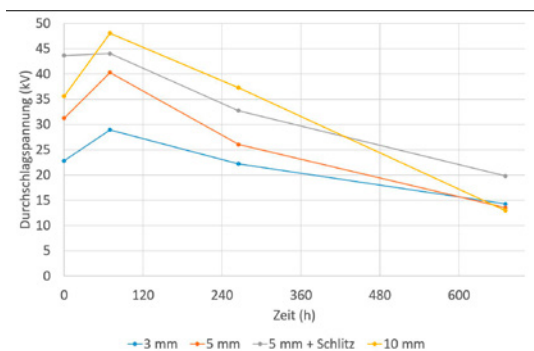


Abb. 6: Durchschlagsspannungen der Leiterplattentestmuster mit den Abständen 3, 5 und 10 mm sowie 3 mm mit einem Schlitz über der Zeit der Wassersättigung in deionisiertem Wasser.

4. VERHALTEN VON BAUELEMENTEN IN DRUCKNEUTRALEN HOCHSPANNUNGSKOMPONENTEN

In elektrischen Komponenten in druckneutraler Bauweise sind beim Einsatz in der Tiefsee auch alle Bauelemente entsprechend der Wassertiefe einem erhöhten Druck ausgesetzt. Insbesondere bei Kondensatoren besteht die Gefahr einer Zerstörung oder zumindest veränderter elektrischer Eigenschaften unter Druckeinwirkung. Diese sind entsprechend zu untersuchen, um eine Auswahl geeigneter Elemente sowie eine Anpassung des elektrischen Designs der Komponenten vornehmen zu können. Im Vorhaben konzentrierten sich die Untersuchungen auf Typen von Kondensatoren und Transformatorkernen, welche als besonders empfindlich eingeschätzt wurden. Für eine zuverlässige Auswahl müssen jeweils für jeden Typ eine Reihe von Elementen aus unterschiedlichen wie auch aus gleichen Herstellungsladungen geprüft werden. Hierzu wurde ein Testsystem erarbeitet, mit dem eine möglichst hohe Zahl von Elementen gleichzeitig im kleinen Drucktank getestet werden kann. Zusätzlich muss die Messschaltung Einflüsse der Messleitungen minimieren. Als ein Beispiel wurde eine Testanordnung für den gleichzeitigen Test von bis zu 15 Kondensatoren mit Reed-Schaltern zur Kompensation der parasitären Induktivitäten und Kapazitäten erarbeitet.

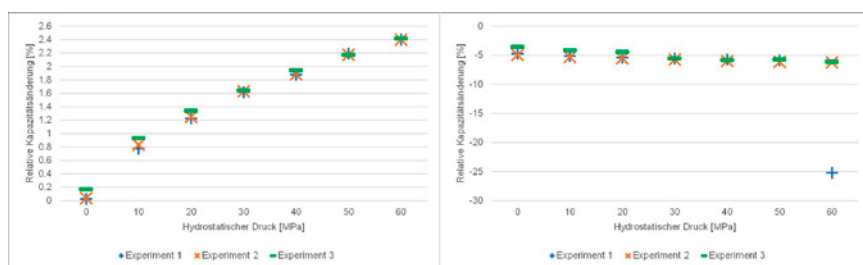


Abb. 7: Prozentuale Veränderung der Kapazität unter Druck von eingebetteten metallisierten Polypropylen-Film-Folienkondensatoren (47 nF) bei 1 kHz (links) sowie von Multilagen-Keramik-Kondensatoren (47 nF) bei 10 Hz (rechts).

Unter anderem wurden 12 unterschiedliche Kondensatoren im Bereich von 1 nF bis 220 mF im Frequenzbereich von 10 Hz bis 4 MHz und im Druckbereich bis zu 600 bar erfolgreich geprüft und für den Einsatz im Demonstrator ausgewählt. Einer systematischen Untersuchung wurden insbesondere Polypropylen-Film-Folienkondensatoren, metallisierte Polypropylen-Film-Folienkondensatoren sowie Multilagen-Keramik-Kondensatoren unterzogen. Es wurden jeweils die Kapazität und der Phasenwinkel über einen großen Frequenzbereich von 10 Hz bis 2,4 MHz analysiert. Abgesehen von Messfehlern bei sehr niedrigen und sehr hohen Frequenzen wurden reproduzierbare über den Frequenzbereich jeweils nahezu konstante Anstiege der Kapazitäten bei Druckerhöhung gegenüber der Referenzmessung bei Atmosphärendruck im trockenen Zustand ermittelt. Der Phasenwinkel unterliegt keinen signifikanten Veränderungen. Wie in Abbildung 7 dargestellt, wurden Abnahmen und Zunahmen der Kapazität um bis zu 8% bei 600 bar ermittelt.

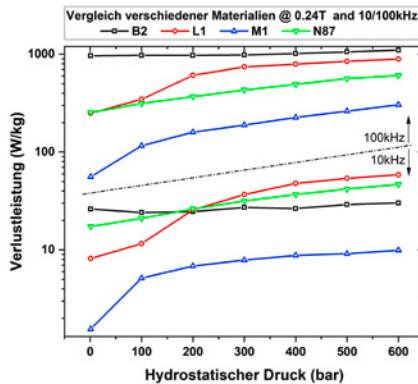


Abb. 8: Verlustleistung für Transformatorenkerne verschiedener Materialien.

Signifikante Effekte der Druckerhöhung wurden außerdem für Transformatorenkerne gefunden. In den Untersuchungen wurden verschiedene Typen von Kernen bzgl. Material, Schichtaufbau und Geometrie mit definierten Wicklungen versehen, in Silikon eingebettet und im kleinen Drucktank bei ansteigendem Druck vermessen. Hierbei wurden die Induktivität und Verlustleistung im Frequenzbereich von 10 bis 100kHz vermessen. Bei allen in Silikon-Gel eingebetteten Kernen wurde ein signifikanter Anstieg der Verlustleistung mit zunehmendem Druck beobachtet. Abbildung 8 zeigt die Testergebnisse für eine Auswahl von Magnetkernen mit gleicher Geometrie aus verschiedenen Materialien. Einige Materialien weisen eine große Variation über den Druck bei geringeren Gesamtverlusten aus, während andere Materialien höhere Gesamtverluste bei geringerer Variation zeigen. Diese Ergebnisse sind vor allem im Hinblick auf die Auswahl von Transformatorkernen für verschiedene Anwendungen von großer Bedeutung.

5. ENTWICKLUNG DRUCKNEUTRALER HOCHSPANNUNGSKOMPONENTEN

Die Entwicklung von Hochspannungskomponenten in druckneutraler Bauweise stellten naturgemäß einen Schwerpunkt im Vorhaben dar. Dabei wurde auf die Ergebnisse für die zu verwendenden Vergussmaterialien und Bauelemente zurückgegriffen. Um die nötige Spannungshöhe in den Halbleiterbaugruppen zu erreichen, wurden jeweils Reihenschaltungen in Kombination mit einer Kaskadierung der Module verwendet. Die Module wurden schrittweise für aufsteigende Leistungen und Ausgangsspannungen erarbeitet.

Für den Test und Betrieb der Komponenten wurden Hochspannungsnetzteile für die Bereitstellung von 20kV und 60kV mit Leistungen von zunächst 100W bis final 5kW erarbeitet. Bei den Tests der vergossenen Hochspannungsnetzteile unter Druck wurden in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Transformatorenkernen Änderungen der Induktivitäten in Bauteilen mit weichmagnetischem Kern gefunden. Daraufhin erfolgten Anpassungen der Baugruppen. Eine vergossene Baugruppe mit Hochspannungskabel ist in Abbildung 9 (links) gezeigt.

Für die Rückwandlung der Hochspannung in 110V Niederspannung wurden Konverter in der Form von Multilevel-Wandlern erarbeitet. Diese bestehen auf der Primärseite aus in Serie geschalteten Halbbrücken, von denen jede einzelne 3 kV Spannung sperren kann. Die Sekundärseiten sind parallelgeschaltet, um die hohen Ströme auf der 110V Ebene bereitzustellen. Durch die passive Spannungsverteilung und die Minimierung der Bauteilanzahl konnte die Betriebsstabilität und die Lebensdauer der Module erhöht werden. Die einzelnen Baugruppen des Multilevel-Wandlers wurden im Rahmen der Entwicklung auf ihre Verlustleistung charakterisiert und in das Gesamtmodul eingebunden. Es wurden Demonstratoren für die Trafokonzepte aufgebaut und sowohl unter Normalbedingungen als auch unter Druck auf Isolationsfähigkeit getestet. Ein finales Transformator-konzept wurde mit planaren Ferritkernen ausgewählt, aufgebaut und getestet. Der finale Aufbau des Multilevel-Wandlers erfolgte aus einzelnen Zellen, wie in Abbildung 9 rechts dargestellt, welche vorab bei reduzierter Spannung unter Druck auf ihre Funktionsfähigkeit hin getestet wurden. Parallel zur Erarbeitung der Zellen des Multilevel-Wandlers erfolgte die Bereitstellung einer geeigneten Ansteuerung. Aufbauend auf analytischen Voruntersuchungen wurde die voll digitale Steuerung in Form eines Multi-Core Microcontrollers und nicht eines FPGA ausgeführt.

Um die Versorgung der Schaltungen auf den verschiedenen Spannungsebenen des Multilevel-Wandlers und der Halbleiterschalter sicherzustellen, wurden 10W DC/DC Wandler mit 24V Eingangs- sowie Ausgangsspannung aufgebaut, welche isoliert über eine Potentialdifferenz von 60 kV arbeiten und erfolgreich getestet werden konnten.

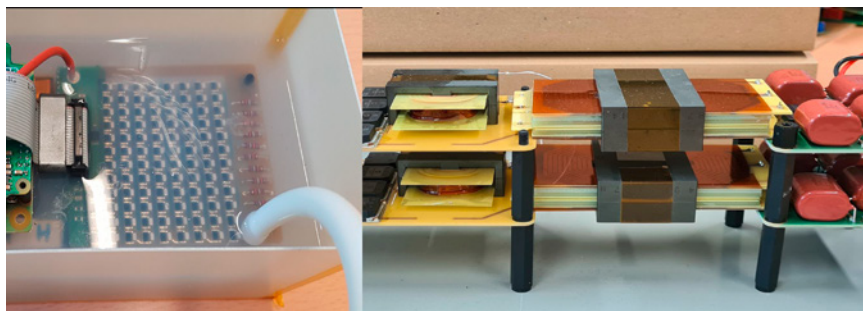


Abb. 9: Hochspannungsnetzteil im Verguss (links) und zwei Zellen des Multilevel-Wandlers in Kaskadenbauweise (rechts).

Ein notwendiger Anteil des Projekts ist die Fähigkeit, einzelne Bereiche der Hochspannung voneinander zu isolieren. Der druckneutrale Aufbau schließt die Verwendung von mechanischen Schaltern von vornherein aus. Daher wurde ein Hochspannungsschalter auf der Basis von Halbleitertechnik konzipiert und aufgebaut, um anschließend sein Schalt- und Isolationsverhalten unter hohem Druck und bei Wassersättigung im Verguss zu testen. Es wurden zwei Versionen des Schalters mit jeweils unterschiedlichen Halbleiterelementen (normally-on SiC JFETs und SiC MOSFETs) entworfen. Die Hochspannungsschalter mit JFETs wurden mit bis zu 40 kV unter Normalbedingungen und bis

zu 20kV unter Druck erfolgreich getestet, wobei Schaltzeiten in der Größenordnung von 150µs passend für die Applikation erreicht wurden. Der Vorteil der JFET ist die Möglichkeit, sie in einer Kaskode vollständig passiv anzusteuern. Ein Funktionsmuster zeigt Abbildung 10. Dies limitiert die Bauteilzahl und die möglichen Fehlermodi. Leider verhindern die Leckströme durch die Bauteile eine über 40kV hinausgehende Isolation mit diesem Schaltertyp. Für höhere Spannungen wird daher auf seriell geschaltete MOSFET ausgewichen.

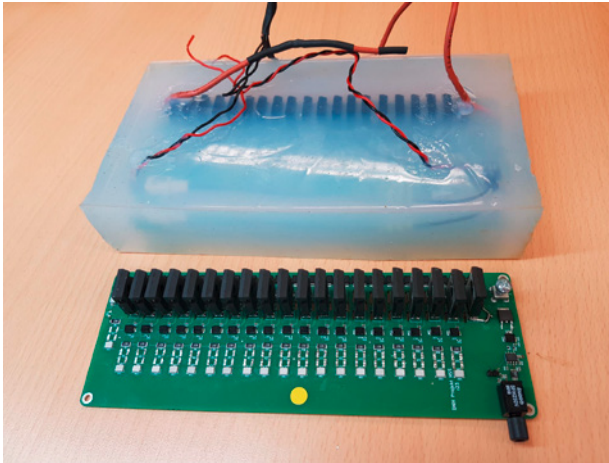


Abb. 10: Hochspannungsschalter vergossen und unvergossen.

6. AUFBAU UND TEST DES DEMONSTRATORS

Neben den im vorigen Abschnitt beschriebenen Hochspannungskomponenten enthält der Demonstrator einen Niederspannungsteil zur Energiebereitstellung. Entsprechend den Anforderungen eines Versorgungssystems in der Tiefsee umfasst der Niederspannungsteil eine Pufferbatterie mit einem Ladewandler, welcher aus dem Multilevel-Wandler gespeist wird. Als Simulation der Energieverbraucher und zur Rückführung der Energie in den Hochspannungsteil wird ein Hochspannungs-Energiewandler 110 V // 60 kV mit der Leistung von 5 kW integriert. Das Batteriemanagementsystem beinhaltet außerdem einen beidseitig trennenden 110V Leistungsschalter. Die Pufferbatterie ist aus 24V Batterieblöcken zusammengesetzt. Alle diese Baugruppen wurden in Form spezifischer Funktionsmuster in druckneutraler Bauweise erarbeitet. Abbildung 11 zeigt exemplarisch den fertiggestellten Hochspannungsenergiewandler mit Silikonknetmasse vergossen in einer PMMA-Box. Sichtbar sind die Gleichrichtungs-, Schutz- und Glättungsplatinen sowie das Hochspannungskabel auf der Sekundärseite.

Ein weiterer Bestandteil des Demonstrators ist ein Steuer- und Monitoring-System. Entsprechend dem Demonstratorkonzept (siehe Abschnitt 2) wurden hierfür einheitliche Steuermodule für die Hoch- und Niederspannungskomponenten mit Analog-Digital-Wandlern und Optokopplern entwickelt, in druckneutraler Bauweise ausgeführt und erfolgreich unter Wassersättigung und Druck getestet.

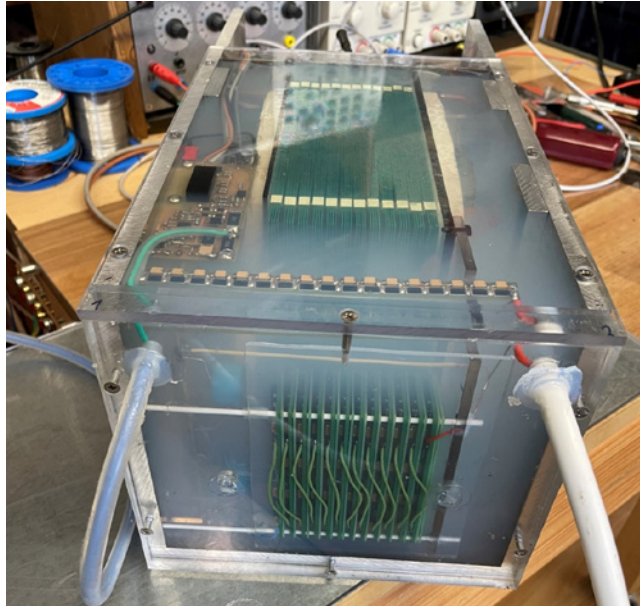


Abb. 11: Fertiggestellter Hochspannungswandler in druckneutraler Bauweise.

Die fertiggestellten Komponenten des Demonstrators werden zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts auf einem Rahmen montiert und verkoppelt. Der finale Test des Systems, welches in Abbildung 12 illustriert ist, erfolgt in der Restlaufzeit des Vorhabens. Dazu wird das autonome Energieversorgungssystem in den Drucktank abgesenkt. Das interne Steuersystem wird durch den Deckel mit Steuerleitungen verbunden und die Pufferbatterie über eine Niederspannungsleitung aufgeladen. Nach Schließung des Deckels folgt die energieautarke Testphase mit unterschiedlichen Druckbelastungen bis 600 bar, in der die Komponenten eine Energieübertragung und -wandlung mit der Leistung von 5 kW simulieren.

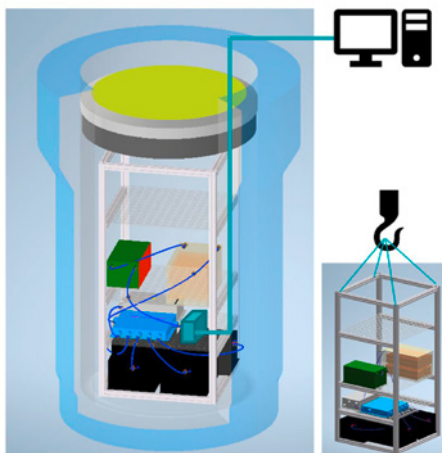


Abb. 12: Demonstratortest im großen Drucktank

ZUSAMMENFASSUNG

Für die zukünftige Umsetzung eines leichten und flexiblen Energieversorgungssystems für Tiefseeanwendungen wurden Hoch- und Niederspannungskomponenten in druckneutraler Bauweise und ohne mechanische Schaltkontakte als Funktionsmuster erarbeitet, erfolgreich getestet und in einem Demonstrator zu einem energieautarken Gesamtsystem vereinigt. Hiermit wurden die Grundlagen gelegt, um auf Basis von Hochspannung bis zu 60 kV künftig Energie durch leichte und flexible Kabel zu übertragen. Die erarbeiteten Technologien für druckneutrale Hochspannungswandler, Batteriesysteme und Schalter lassen sich nutzen, um am Ende der Kabel ein modulares Versorgungssystem für Tiefseeanwendungen unterschiedlicher Spannungsebenen und Leistungen von mehreren kW zu konzipieren. Die erfolgreichen Tests mit einem Druck von bis zu 600 bar eröffnen das Potenzial für eine Anwendung in Meerestiefen von mindestens bis zu 6000 m. In Nachfolgeaktivitäten soll auf dieser Basis ein Funktionsmuster für ein Kabelsystem und eine Versorgungsstation erstellt werden, welche auf einem Lander integriert wird. Von besonderer Bedeutung für die Markterschließung der Technologie durch die beteiligten Industriepartner werden im nächsten Schritt Funktionstests gemäß TRL 5 in einer realen Einsatzumgebung, also land- oder schiffsseitig angebunden im Flach- und Tiefwasser sein.

Für den Aufbau druckneutraler elektrischer Systeme erfolgten Untersuchungen zu Verguss- und Isolationssystemen, vergossenen Schaltkreisen und besonders sensiblen Bauelementen unter der komplexen Wirkung von Wassersättigung, Druck und Hochspannungsbelastung. Die ermittelten Veränderungen der Isolationsfestigkeit von Isoliersystemen, der Kapazität von Kondensatoren und des Verlustfaktors von Transformator-kernen mit ansteigendem Druck bzw. bei Wassersättigung der druckneutral eingebetteten Elemente sind in vielen Fällen signifikant, was für eine spätere Produktentwicklung bei den beteiligten Industriepartnern von entscheidender Bedeutung ist. Dennoch konnten im Vorhaben im Vergleich zur Vielfalt möglicher Bauarten und Bauformen von Leiterplattenstrukturen und Bauelementen nur erste Indizien für ausgewählte und besonders kritische Elemente bzgl. der Veränderung ihrer elektrischen Eigenschaften ermittelt werden. Die erarbeiteten Testmethoden stehen deshalb im Ergebnis des Vorhabens für umfangreiche Nachfolgeuntersuchungen bereit.

DANKSAGUNG

Das Projektkonsortium bedankt sich sehr für die vom Projektträger Jülich (PtJ) erhaltene Unterstützung bei der Projektbearbeitung und -koordinierung sowie für die vom BMWK gewährte finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens. Unser besonderer Dank gilt Frau Bude und Herrn Lehmann vom PtJ sowie Herrn Dr. Horstmann vom BMWK.

LITERATUR

- [1] C R Barnes et al., "Challenges, benefits and opportunities in operating cabled ocean observatories: perspectives from NEPTUNE Canada", IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, 2011.
- [2] R Bachmayer et al., "Oceanographic research using remotely operated underwater robotic vehicles: exploration of hydrothermal vent sites on the mid atlantic ridge" *Marine technology society Journal*, Nr. 32, 3:37-47, 1998.
- [3] L L Whitcomb, "Underwater robotics: Out of the research laboratory and into the field", IEEE International conference on Robotics and Automation, vol. 1, pp. 709-716, 2000.
- [4] A Purser et al., "Ocean floor observation and Bathymetry Systems (OFOBS): A new towed camera/sonar system for deep-sea habitat surveys", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 44, no. 1, Jan 2009.
- [5] P Favali, L Beranzoli, A de Santis, "Seafloor Observatories – a new vision of the earth from the abyss", Praxis Publishing & Springer, ISBN 978-3-642-11373-4
- [6] G Körner, ENITECH GmbH, „Druckneutrale Systeme - Gestaltung, Umsetzung und Test von druckneutralen Systemen und Einrichtungen für den Langzeit- oder ständigen Unterwasserbetrieb in Fahrzeugen und Unterwasserbauwerken“. Schriftenreihe Projektträger Jülich, Statustagung Maritime Technologien, Tagungsband der Statustagung, 2008. S. 155-176, Förderkennzeichen 03SX220.
- [7] G Körner (ENITECH GmbH), R Bannasch (EvoLogics GmbH), H Lehr (TUB), S Krüger (IOW), K Breddermann (URO), J Waniek (IOW), „Druckneutrale Systeme Tiefsee“, Schriftenreihe Projektträger Jülich, Statustagung Maritime Technologien, Tagungsband der Statustagung, 2013. S. 125-144, Förderkennzeichen 03SX276.
- [8] S Arumugam, Y Haba, G Koerner, D Uhrlandt, M Paschen, "Understanding partial discharges in low-power relay and silicone cable modified to suit high-voltage requirement of deep sea electrical system". *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol.28, p. e2542, 2018. <https://doi.org/10.1002/etep.2542>
- [9] Salama Manjang, Ikhlas Kitta, Khayrunnisa B.Muhammadiyah, Nurul Izra Mulya R., "Effect of water diffusion on dielectric behavior of polymer insulators", *The 5th International Conference on Electrical Engineering and Informatics 2015, Bali, Indonesia, Aug. 2015*.
- [10] O L Hestad and S Hvidsten, "Condensation of water vapour in XLPE insulation at different cooling rates and pressures", 2006 IEEE International symposium on electrical insulation, pp. 515 – 518, Jun. 2006.

- [11] J-S Lai, F Z Peng, "Multilevel converters - A new breed of power converters" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32 no. 3, pp. 509-517., 1996 <https://doi.org/10.1109/28.502161>
- [12] F Behlke, „MOSFET-Hochspannungsschalter mit extrem kurzer Schaltzeit“, DE000003630775C2
- [13] W Attenberger, "Bidirektionaler resonanter Wandler", DE102011119355A1

SeaFeather10k –

SEA FILTER AND EXTRAFINE PARTICLE SAMPLER AS A TETHERED SYSTEM FOR THE DEEP AND HADAL ZONES OF THE OCEAN (10.000 M)

AUTOREN

DIPL.-PHYS. ANDREAS HECKEL	FIELAX GMBH, BREMERHAVEN
DR. RER. NAT. JOHANNES KÄSSBOHRER	FIELAX GMBH, BREMERHAVEN
DR. RER. NAT. FRANZISKA NEHRING	FIELAX GMBH, BREMERHAVEN
DR. RER. NAT. WALTER GEIBERT	AWI, BREMERHAVEN
M.SC. DENNIS KÖHLER	AWI, BREMERHAVEN

1. EINLEITUNG

Das Sammeln von suspendierten Feststoffen im marinen Bereich, wie es zur Untersuchung von Stoffkreisläufen, zum Verfolgen von Mikroplastik oder zur Überwachung von Schadstoffausbreitung beim Rohstoffabbau erforderlich ist, benötigt moderne Technologien mit autonomer Steuerung, Tiefseetauglichkeit und zuverlässiger Energieversorgung. Trotz großer Fortschritte in den marinen Technologien fehlt es bisher an geeigneten Systemen zur In-situ-Beprobung und Anreicherung verschiedenster Mikropartikel (Schadstoffe, Schwebstoffe etc.) direkt aus der Wassersäule, insbesondere für große Wassertiefen. Diese Systeme sind jedoch sowohl für den wissenschaftlichen als auch den industriell-wirtschaftlichen Einsatz dringend notwendig, da in den kommenden Jahrzehnten neben dem weiteren Prozessverständnis insbesondere die Ausbreitung von anthropogenen Schadstoffen im Ozean im Fokus der Forschung stehen wird (Stichwort „Mikroplastik“). FIELAX GmbH hat daher in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (kurz AWI) das Projekt „SeaFeather 10k“ entwickelt, um diese Marktlücke im Bereich von Partikelbeprobungsgeräten zu schließen und ein zukunftsweisendes Produkt in der Meerestechnik herzustellen.

Im zeitlichen Rahmen von 3 Jahren wurde innerhalb des Verbundprojektes der Bau eines einsatzfähigen Unterwasser-Filtrationssystems mit intelligenter Steuerung umgesetzt, welches auch in den tiefsten ozeanischen Regionen (Hadopelagial, >6000 m Tiefe) einsatzfähig ist.

Folgende fortschrittliche Teilziele wurden beim Bau des Systems verfolgt:

- › **Smarte Steuerung:** Es wurde eine zentrale Steuerelektronik entwickelt, welche die Daten angeschlossener digitaler und analoger Sensorik erfasst und speichert, sowie die Steuerung des Beprobungsvorgangs aufgrund dieser Messparameter (z. B. Temperatur, Druck, Trübung, Salinität, Pumpvolumen) ermöglicht. Gegenüber bisherigen

Systemen kann also neben einer einfachen Zeitsteuerung des Pumpeneinsatzes, ein sensorgesteuerter Pumpeneinsatz erfolgen.

- › **Moderne Akkutechnik:** Die Stromversorgung erfolgt bei den älteren Modellen über wieder aufladbare Blei-Akkus, die jedoch wartungsintensiv sind. Bei einem anderen kommerziell verfügbaren System kommen standardmäßig Einwegbatterien zum Einsatz, was ggf. hunderte Kilogramm an Batterien für eine Schiffsausfahrt erfordert. Innovatives Ziel war es somit, eine ressourcenschonende wartungsarme Akkutechnik zu verwenden, die ein Aufladen ohne Öffnen des Druckgehäuses ermöglicht. Somit werden Fehler bei der Handhabung der Druckgehäuse, die ggf. zu einer Beschädigung führen können, vermieden. Gleichzeitig wurde somit das Gewicht des Gesamtsystems deutlich leichter. Durch einen modularen, skalierbaren Aufbau kann man sowohl kurzzeitig, stationsweise eingesetzten Systemen als auch Langzeitverankerten gerecht werden kann.
- › **Softwaresteuerung:** Die Programmierung des Filtrationssystems und angeschlossener Sensoren/Aktoren sowie das spätere Auslesen der erfassten Daten erforderte die Entwicklung einer komfortablen grafischen Bediensoftware, die auf unterschiedlichen Betriebssystemen einsetzbar ist. Gegenüber bereits bestehenden Systemen stellt dies eine deutliche Verbesserung dar.
- › **Neu-designter Filterkopf:** Unter Anwendung von CAD sowie 3D-Modellierung wurde ein kompaktes Format für einen Filterkopf gefunden. Die Fertigung erfolgte in der AWI-eigenen Tiefseewerkstatt.
- › **Pumpeneinheit:** In diesem Teilaspekt des Projektes erfolgte zunächst die Evaluierung verschiedener Pumpentypen hinsichtlich der speziellen Anforderungen in der Tiefsee und hinsichtlich der Einsatzvariabilität wie z. B. variabler Pumpenströme. Die letztendlich verwendete kommerziell erwerbliche Pumpe wurde durch Modifikationen für den Einsatz in der Tiefsee tauglich gemacht.
- › **Druckgehäuse und Trägerstruktur:** Der Projektpartner AWI spezifizierte und designte ein kompaktes Druckgehäuse für die Komponenten Akkutechnik und Steuerelektronik. Durch die Verwendung unterschiedlicher Gehäusedeckel mit variablen Schnittstellen für die jeweils angeschlossene Sensorik wurde ein modulares System realisiert. Weiterhin wurde ein Gerätegestells entworfen, welches eine sichere und gute Handhabung des Filtrationssystems an Bord erlaubt, ohne deutlich Gewicht beizutragen.

Aufgrund seiner innovativen Steuerungselektronik und intuitiven Bediensoftware, deutlich modernisierter Akkutechnik, zuverlässiger Pumpentechnik und generell verbesserter Handhabbarkeit, stellt das neue, leistungsstarke Gerät einen deutlichen Fortschritt gegenüber den wenigen, am Markt vorhandenen Systemen dar.

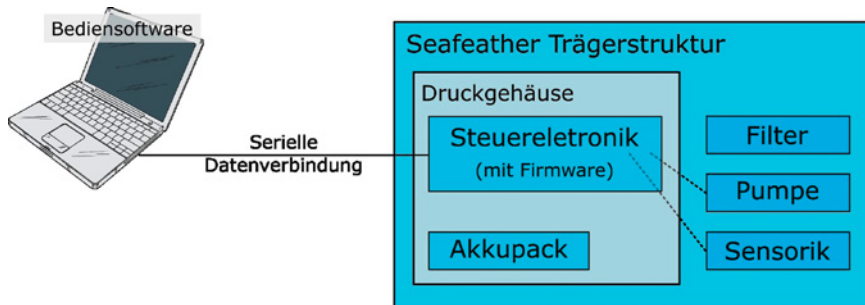


Abb. 1: Kernkomponenten des Seafeather-Systems

2. ELEKTRONISCHE KOMPONENTEN, SENSOR- UND AKKUTECHNIK

Bei der Entwicklung der Steuerungselektronik standen Flexibilität und Modularität im Vordergrund. Die Bereitstellung unterschiedlicher Hardwareschnittstellen erhöht die Flexibilität bei der Auswahl der externen Sensoren und reduziert den Entwicklungsaufwand beim Einsatz neuer Sensoren. Unter Umständen ist dann die Unterstützung geänderter Sensorik allein durch die Entwicklung neuer Treibersoftware realisierbar.

Die Unterbringung der Elektronik in einem Druckgehäuse mit Druckfestigkeit bis 10000 m stellt die Rahmenbedingung für das Design der Elektronikkomponenten und erfordert die Aufteilung einzelner logischer Baugruppen auf unterschiedliche Platinen (Abbildung 2) die dann stapelbar verbunden werden. Dabei wurden Stromversorgung und Steuerungselektronik räumlich getrennt und lassen sich bei Bedarf auch unabhängig voneinander aktualisieren oder erweitern. Das Herzstück der Steuerungselektronik ist ein Teensy 3.6 Mikrokontroller. Dieser verfügt über eine niedrige Stromaufnahme in Sleep Modus und bietet eine hohe Bandbreite an Schnittstellen (Digital RS232, SPI, I2C, Analog, PWM), welche bereits einfach verfügbar nach außen geführt sind. Die Programmierung des Mikrokontrollers wird mittels Arduino Framework deutlich vereinfacht da es eine Hardwareabstraktion bietet und erlaubt den Fokus der Entwicklung auf die Steuerung und Datenerfassung zu legen (siehe Kapitel 3 Softwareentwicklung). Zusätzlich wurde ein Controller zur Machbarkeitsprüfung von Drahtloskommunikation integriert.

Eingangsparameter für die Auslegung der Akkuleistung waren eine allgemein abgestimmte Pumpleistung von ca. 500l/h, die für 3 Stunden verfügbar sein soll. Der Gegen-Druck durch den Filter wurde mit ca. < 0.6bar und die elektrische Leistung mit ca. 48 W angenommen. Die moderne Akkutechnik realisierten wir durch die Verwendung von Nickel-Metallhydrid Mono Zellen mit je 1.2V Spannung und 10Ah Kapazität, wobei die anvisierten 24V Betriebsspannung durch den Zusammenschluss von 20 Zellen in einem Akkupack erreicht wurden. Das Laden der Akkus erfolgt durch einen SubConn-Unterwasserstecker, der am Deckel des Druckgehäuse verbaut ist. So können die Akkus zum Laden im Druckgehäuse verbleiben während zugleich durch Schaltungsdesign sichergestellt wird, dass die Steuerelektronik während des Ladevorgangs vom Akku getrennt ist. Der Ladestrom wurde auf 2.0A begrenzt, da sonst die Wärmeentwicklung im Gehäuse

zu hoch wird. Zur Überwachung der Wärmeentwicklung beim Laden im Gehäuse wurde ein Temperatursensor installiert, der den Ladevorgang ggf. unterbricht. Eine leistungsfähige, jedoch einfach zu handhabende Ladeelektronik für den Einsatz an Bord wurde zugekauft.

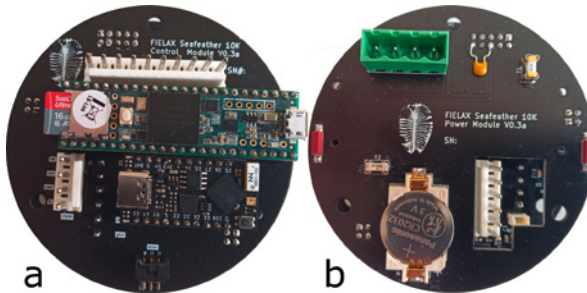


Abb. 2: Platinenansichten a) Steuermodul mit Mikrocontroller, b) Powermodul zur Spannungsversorgung

Die gestapelten Platinen und die NiMH-Akkus wurden zusammen in einem Druckgehäuse mit Tiefentauglichkeit bis 10000m untergebracht (Abbildung 4). Durch das Design mehrerer Gehäusedeckel (Abbildung 3) unter Verwendung von SubConn-Unterwassersteckern der BH-Serie konnten drei Varianten des Pumpensystems geschaffen werden.

- > BASIC: Diese Variante verfügt über eine einfache Zeitsteuerung. Die Pumpleistung ist konfigurierbar und die Durchflussmenge wird erfasst.
- > ADVANCED: Neben den Funktionen der BASIC-Variante, die hier ebenfalls verfügbar sind, wurde an die ADVANCED-Variante zusätzliche Sensorik in Form eines Keller Drucksensors (Transmitter Serie 30 PA-10LX / 1000bar) und eines AML CT X-Change zur Erfassung von Leitfähigkeit und Temperatur angeschlossen. Die Daten dieser Sensoren werden ebenfalls digital erfasst und die Pumpe lässt sich über diese Messwerte steuern, z. B. im Szenario „Pumpe an bei bestimmter Temperatur“.
- > SMART: Die SMART-Variante verfügt über eine noch größere Anzahl externer Sensoren. Hier wurde zunächst eine Seabird SBE19 CTD an das System angeschlossen. Diese CTD bietet Schnittstellen für weiteren Sensoren wie Sauerstoff, pH-Wert und Trübung, deren Messwerte in das Seabird-Protokoll eingehen. Durch das Auslesen dieses Protokolls können die Messdaten zur Steuerung der Pumpe herangezogen werden z. B. im Szenario „Pumpe ausschalten, wenn Trübung Grenzwert überschreitet“.

Auf jeweils einem Deckel des Druckgehäuses erfolgt über eine serielle Schnittstelle bei allen drei Varianten die Bedienung und der Datentransfer. Im Messbetrieb wird auf diesen Kommunikationsport ein Blindstecker aufgesteckt, der die Stromversorgung zwischen Akku und Elektronik herstellt und eine Status-LED enthält, die Informationen über Betriebszustand und aufgetretene Fehler ermöglicht. Der Deckel auf der anderen Seite des Gehäuses weist je nach Pumpentyp unterschiedliche Schnittstellen auf. Bei allen drei Varianten wird über eine dieser Schnittstellen der Akku geladen und die Pumpe gesteuert.

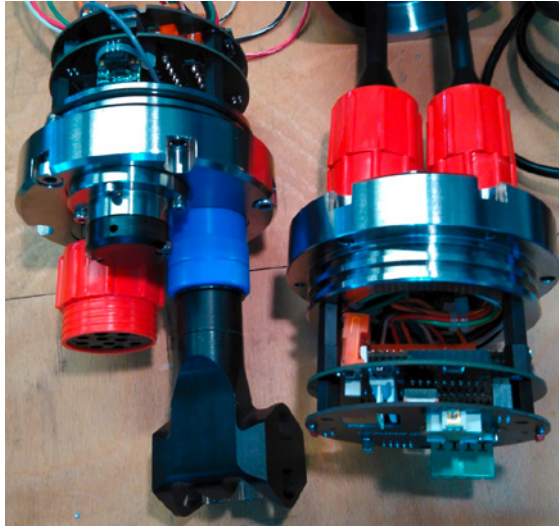


Abb. 3: Links: Deckelvariante Advanced mit Druck- und CT-Sensor. Rechts: Deckelvariante Smart mit serieller Schnittstelle für externe Sensoren.

Bei der ADVANCED- und der SMART-Variante wird an dieser Schnittstelle zudem die Spannungsversorgung für einen Durchflusssensor (BIOTECH, Serie FCH-C-PA-N/0,50-30,0 L/min) und einen Differenzdrucksensor (Keller, Transmitter Serie 30 PD-33X/1bar) bereitgestellt sowie deren Daten eingespeist. In der ADVANCED-Variante sind zusätzlich der Drucksensor sowie der AML CT X-Change direkt im Gehäusedeckel integriert. Die SMART-Variante weist stattdessen eine weitere Schnittstelle für die Kommunikation mit der CTD auf. Grundsätzlich sind alle Schnittstellen konfigurierbar und können je nach Bedarf modifiziert werden.



Abb. 4: Druckgehäuse, Akkupack und verschiedene Deckelvarianten des „SeaFeather 10k“-Systems

3. SOFTWAREENTWICKLUNG

Auch bei der Softwareentwicklung lag das Augenmerk vor allem auf Innovation, Flexibilität und Modularität. Hinsichtlich der Softwareentwicklung muss unterschieden werden zwischen der Entwicklung der Firmware, also der eingebetteten Software auf dem Mikrokontroller zur Datenerfassung, Steuerung und Kommunikation sowie der eigentlichen Desktopsoftware zum Datendownload, Konfiguration des Pumpprozesses und

einfachen Datenvisualisierung. Beide Komponenten kommunizieren über ein speziell entwickeltes Protokoll. Bei der Protokollentwicklung stand eine kompakte und sichere Datenübertragung zwischen Desktopsoftware und Firmware im Mittelpunkt. Dabei können zwei Betriebsmodi unterschieden werden, einerseits die autonome Messung, bei der der Messablauf in der Steuerelektronik konfiguriert wird, im Messeinsatz aber keine aktive externe Datenverbindung besteht. Zum anderen die Live-Messung, bei der eine digitale Verbindung zur Steuereinheit unter Wasser besteht. Der letztere Fall birgt für die Kommunikation größere Herausforderungen, da je nach Verbindungstyp, große Signallaufzeiten und äußere Störeinflüsse zu Übertragungsverzögerungen führen können. Dem wurde bei der Entwicklung des Übertragungsprotokolls Rechnung getragen. Die serielle Verbindung unterstützt eine hohe Anzahl von Baudraten. Zudem wurde ein Modus zur automatischen Erkennung der zuletzt eingestellten Baudraten implementiert. Die Verbindung zwischen Desktopsoftware und Firmware wird durch einen 3-Wege-Handshake initiiert. Im Weiteren sind die einzelnen Datenpakete möglichst klein gehalten und die korrekte Übertragung wird durch Prüfsummen abgesichert. Die unbekanntenen Signallaufzeiten werden durch Umsetzung eines Client-Server-Modells berücksichtigt. Dabei bildet die Firmware den Server und die Desktopsoftware den Client ab. So können Unterbrechungen des Messablaufs durch Verzögerungen bei der Kommunikation minimiert werden. Die einzige Ausnahme bildet die eigenständige Übertragung von Live-Daten durch die Steuereinheit, die einen minimalen Datenstrom mit einer konfigurierbaren Auswahl aktueller Messdaten darstellt, die auch ohne Handshake übertragen und interpretiert werden können.

Weiterhin kann Sensorik, die über den seriellen Sensoranschluss mit der Steuerelektronik verbunden ist, z. B. die Seabird CTD, über einen eigens bereitgestellten Tunnelmodus direkt mit der Herstellersoftware konfiguriert werden, ohne sie von der Seafeather-Steuereinheit trennen zu müssen.

3.1. DESKTOPSOFTWARE

Die Entwicklung der Desktopsoftware erfolgte in einer ELECTRON-Umgebung basierend auf JavaScript / Node.js. Somit wurde gewährleistet, dass die Desktopapplikation für verschiedene Ziel-Betriebssysteme verwendbar ist. Die Nutzung moderner Webtechnologien erleichtert den zukünftigen Einsatz auf mobile Plattformen (z. B. Tablets). Die Implementierung des Backend, also der hardwareseitigen Kommunikation und des Dateimanagements, wurde mittels Node.js realisiert (Abbildung 5). Die Benutzeroberfläche (Frontend) ist webbasiert und die Kommunikation zwischen Frontend und Backend erfolgt mittels eines Websockets.

Die Bediensoftware erlaubt sowohl das Konfigurieren von automatisierten, auf Sensorwerten basierenden Messzyklen als auch die manuelle Steuerung. Konfigurationen und Messdaten werden auf einer SD-Karte gespeichert. Selektierte Sensorwerte und Statusmeldungen können live übertragen werden. Nach der Messung können die Messdaten heruntergeladen werden. Ein Zurücksetzen der Konfiguration auf Werkseinstellungen sowie

Formatierung der SD-Karte ist ebenfalls möglich. Neben der eigentlichen Datenerfassung wurde großer Wert auf die Visualisierung der Sensordaten gelegt. So können auch ältere Messdateien wieder eingelesen und dargestellt werden.

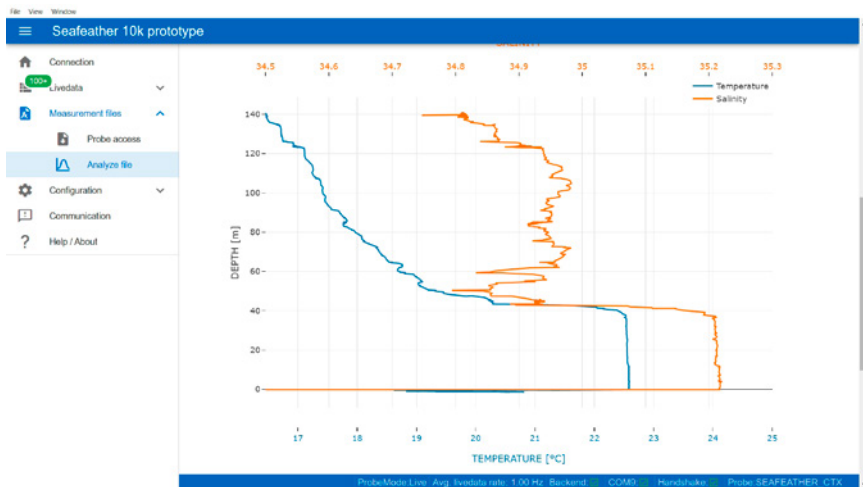


Abb. 5: Beispielsicht der Desktopanwendung

3.2. FIRMWARE

Die Kernfunktionalität der Firmware besteht aus der Initialisierung der angeschlossenen Sensorik, der zyklischen Auswertung eingehender Daten der einzelnen Sensormodule, der Aktualisierung des Zustandsautomaten und der Verarbeitung der externen Kommunikationsanfragen. Durch die Anforderung hoher Flexibilität der Hardware ist softwareseitig eine große Bandbreite verschiedener Kommunikationsprotokolle zu implementieren. Die hardwarenahe Umsetzung des Ansprechens unterschiedlicher Schnittstellen wie z. B. SPI, I2C, UART wird dabei durch die Verwendung des Arduino Frameworks erleichtert. Die Kommunikation mit der angeschlossenen Sensorik ist durch die Entwicklung modularer Treiberkomponenten umgesetzt, welche die jeweiligen Befehlsätze der Sensorik abbilden. Die Implementierung des Protokolls zur Kommunikation mit der Desktop-Software ist ebenfalls in einer Bibliothek ausgelagert.

Der Ablauf eines individuellen Mess- und Pumpeinsatzes wird durch einen vierstufigen zyklischen Zustandsautomaten abgebildet. Einzelne Zustandsübergänge erfolgen dabei ereignisgesteuert. Die Bedingungen für Zustandsübergänge sind mit Hilfe der Desktop-Anwendung konfigurierbar und ermöglichen so den zeit- oder sensorgesteuerten Ablauf des Pumpvorgangs und der Aufzeichnung des Sensordaten. Auch ein manuelles Weiterschalten mittels Desktopsoftware ist vorgesehen. Dabei ist der Umfang der verfügbaren Funktionen abhängig von der jeweiligen Variante (BASIC, ADADVANCED, SMART). Darüber hinaus speichert die Firmware Konfigurationsparameter, Messdaten und Fehlerprotokolle auf dem Dateisystem der verbaute SD-Karte und stellt diese über die Verbindung zur Desktopanwendung zum Download zur Verfügung.

4. PUMPENMECHANISMUS

Die Auswahl des Pumpenmechanismus war essentiell für das Gesamtdesign, da hiervon die Anforderungen bzgl. Druckgehäuse, Batteriekapazität, Schonung der beprobten Partikel, Charakteristik des zeitlichen Verlaufs des Durchflusses etc. abhängen. Diese Entwicklung stellte daher einen Schwerpunkt in der ersten und zweiten Projektphase dar. Grundsätzlich musste hier eine Entscheidung zwischen eingegossenen, weitgehend druckneutralen Komponenten (unempfindlich und günstig, aber nicht wartungsfreundlich) oder Komponenten im Druckgehäuse (zugänglich, aber empfindlich und teuer) an. Nach eingehender Prüfung der möglichen Verfahren und Verfügbarkeit von geeigneten Pumpen am Markt, welche die gewünschten Durchflussmengen liefern können, fiel die Entscheidung auf den Kauf von kostengünstigen Pumpen aus dem Automobilbedarf (BOSCH PCE, 24V). An dieser Pumpe mussten einige Bauteile ersetzt werden, die nicht tauglich für extreme Tiefen waren. Anschließend wurde die Pumpen durch Vergießen unter Vakuum mit einer transparent aushärtenden Silikonmasse (Silglas 25) druckneutral gemacht (Abbildung 6) Die so modifizierte Pumpe wurde Drucktests bis 1000bar unterzogen, die sie problemlos bestand.

Uns ist bewusst, dass die vergossenen Komponenten nicht gewartet oder ggf. repariert werden können. Im Falle eines Ausfalls muss die Pumpe ersetzt werden. Aufgrund der geringen Kosten in der Beschaffung, die für die BOSCH PCE derzeit bei unter 200€ liegen, sind die Pumpen als Verschleißprodukt zu betrachten. Es bleibt zukünftig zu testen, wie lange die Pumpen stabil im Einsatz laufen und ob das Verfahren ggf. modifiziert werden muss.

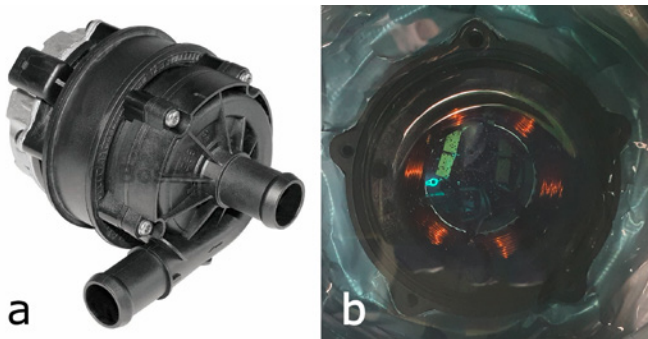


Abb. 6: Ansicht der ausgewählten BOSCH-Pumpe (a) und geöffnete, modifizierte Pumpe während des Vergusses mit Silikonmasse (b)

5. FILTERKOPF

Der Filterkopf sowie ggf. Adsorber zur Extraktion gelöster Komponenten sind das Herzstück der Probenahme. Die Anforderungen an diese Komponente betreffen insbesondere die Materialbeschaffenheit (z. B. metallfrei, organikfrei, plastikfrei, kälte/wärmeresistent, Lösungsmittelresistenz), Zuverlässigkeit (Entlüftung ohne Beschädigung des Filters, Dichtigkeit auch bei Temperaturunterschieden), und die Handhabung (zügige Vor- und Nachbereitung der Beprobung) sowie Modularität (vielfältige Einsatzzwecke). Die spannungsfreie Verbindung der Komponenten ist erfahrungsgemäß herausfordernd. Daher wurden flexible Materialien (Spezialschläuche mit Steckverbindungen) auf ihre jeweilige Eignung getestet.

Ein stapelbarer Filterkopf wurde via CAD entworfen. Die Fertigung des eigentlichen stapelbaren Filterkopfs für den Demonstrator erfolgte in der wissenschaftlichen Werkstatt des AWI. Diese selbst entworfenen Komponenten wurden dann mit den kommerziell erhältlichen Teilen (Schläuche, Verbindungen, ggf. Entlüftung, Adsorber) kombiniert.

Der neu designte Filterkopf erzeugt ein gleichmäßiges Filterbild (Abbildung 7). Aufgrund der gewählten Fertigungsvariante mit einem Teflonstützsieb und dafür notwendigen Stabilisatoren bildeten sich sechs kleinere Bereiche auf dem Filter mit verringertem Durchstrom und daher verringerter Partikeldichte. Ein alternatives Design mit Sinter-PE als Filterträger wurde bereits entworfen und dürfte aufgrund der Möglichkeit zum lateralen Strom dieses Problem nicht aufweisen. Hinsichtlich des Öffnens zum Einlegen und Herausnehmens des Filters ohne Werkzeug erwies sich der Filterkopf als sehr gut handhabbar.

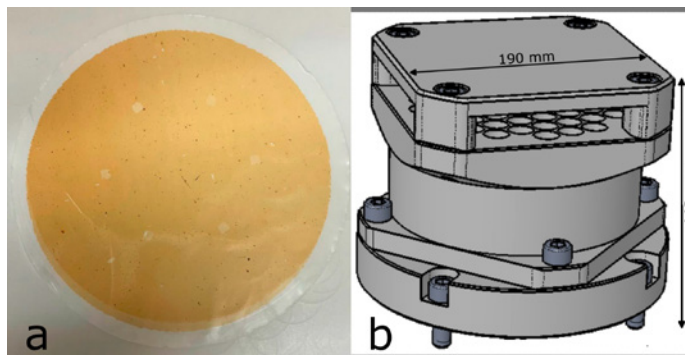


Abb. 7: Filterbild eines besaugten Filters (a) und schematische Zeichnung des Filterkopfes (b)

6. TESTEINSATZ

Das System wurde nach Drucktests im Tank und einem Testeinsatz in der Nordsee für so funktionstüchtig befunden, dass es in der realen Einsatzumgebung einer Forschungsfahrt im Pazifik (FS Sonne, SO289) im Frühjahr 2022 ausgiebig verwendet werden konnte (Abbildung 8). Hier konnte es u. a. in einer maximalen Tiefe von 6000 m eingesetzt

werden. Das gesamte Handling erwies sich dabei als äußerst zufriedenstellend. Insbesondere die einfache Ladetechnik und die intuitive Programmierung sowie das insgesamt deutlich geringere Gewicht heben das neue System von bisher verwendeten Systemen ab. Die anvisierte Pumpleistung von ca. 500l/h über 3 Stunden konnte erreicht werden (Abbildung 9).

Nichtdestotrotz traten auch einige Probleme auf, die eine weitergehende Untersuchung erfordern:

- › Serielle Treiberprobleme unter Windows 11: Als Lösung wurde schließlich eine blanke Neuinstallation von Windows 10 auf einem Geräterechner vorgenommen, wo die seriellen Treiber problemfrei installiert und im SeaFeather-Softwareclient bedient werden konnten. Hier sind Nacharbeiten notwendig, um die angestrebte Betriebssystem-unabhängigkeit sowie die begonnene Implementierung moderner Kommunikationswege voranzutreiben.
- › Der verbaute Differenzdrucksensor funktionierte im realen Einsatz nicht, obwohl er im experimentellen Aufbau stets verlässlich Daten lieferte.
- › Bei einigen Einsätzen wurde die veranschlagte Pumpdauer von 180 Minuten nicht erreicht, da die Elektronik aufgrund zu niedriger Batteriespannung abschaltete, obwohl der Akku zu Beginn der Stationen vollgeladen war ($> 26.5V$). Die Abschaltung bei einer Batteriespannung unter Last bei $< 20V$ ist implementiert, um den Akku zu schützen. Vorgesehen ist jedoch, dass bei voller Last eine Pumpdauer von 3 Stunden möglich sein soll. Dieses Verhalten muss somit noch weitergehend analysiert werden.
- › Neben der Abschaltung aufgrund von zu niedriger Batteriespannung kam es vor, dass die Logfiles unvollständig oder fehlerhaft waren bzw. Daten der CTD trotz korrekten Pumpvorgangs nicht aufgezeichnet wurden. Zu diesem Fehlverhalten gibt es bisher keine konkrete Idee.

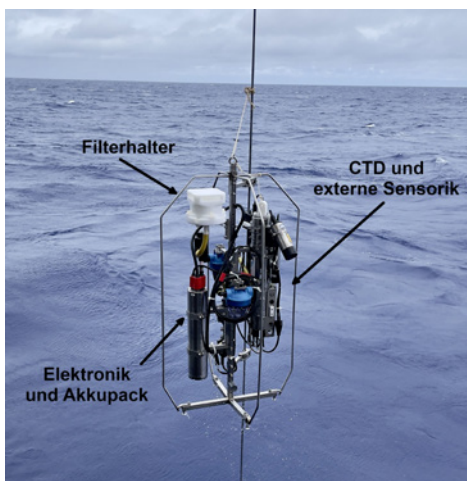


Abb. 8: "SeaFeather 10k"-System während des Einsatzes auf der Forschungsfahrt SO289 des FS Sonne

- › Eine Evaluierung der beobachteten Probleme wurde verzögert, da die eingesetzten Geräte aufgrund der langen Transportwege erst Anfang August 2022 wieder in Bremerhaven eintrafen, so dass zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Veröffentlichung noch keine aussagekräftigen Ergebnisse vorliegen.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSSICHTEN

Mit dem entwickelten „SeaFeather 10k“-System wurde ein innovatives Gerät zu Probenahme mittels Filterbesaugung im marinen Bereich mit maximalen Einsatztiefen bis 10000m geschaffen. Neben einer modernen Akkutechnik, stellt die Nutzung externer Sensoren zur Steuerung des Pumpeneinsatzes aufgrund der gemessenen Parameter eine wesentliche Neuerung dar. Zudem hebt sich das entwickelte System durch die einfache, intuitive Bedienung anhand einer eigens entwickelten Software, sowie durch das erheblich niedrigere Gewicht und insgesamt verbesserte Handhabung von bisherigen Systemen ab.

Das auf der Forschungsfahrt getestete System befindet sich derzeit in der Begutachtung durch die Hersteller, um den beobachteten Problemen auf den Grund zu gehen. Weitere Tests sollen während Forschungsreisen des FS Polarstern im kommenden Herbst/Winter (PS133/1 und PS133/2) stattfinden. Wir gehen daher davon aus, im Frühjahr nächsten Jahres ein verbessertes, weniger fehleranfälliges System zur Verfügung stellen zu können, welches zunächst vor allem durch die Wissenschaft genutzt werden wird. Eine Weiterentwicklung für den industriellen Einsatz z.B. zur Langzeitüberwachung von Schadstoffeinträgen mit den dementsprechend notwendigen Vorgaben wie CE-Zertifizierung ist langfristig anvisiert. Derzeit wird die Fertigung bzw. Anpassung der Pumpensysteme vor allem durch die stark beschränkte Verfügbarkeit elektronischer Komponenten mit Lieferterminen von bis zu 1,5 Jahren behindert.

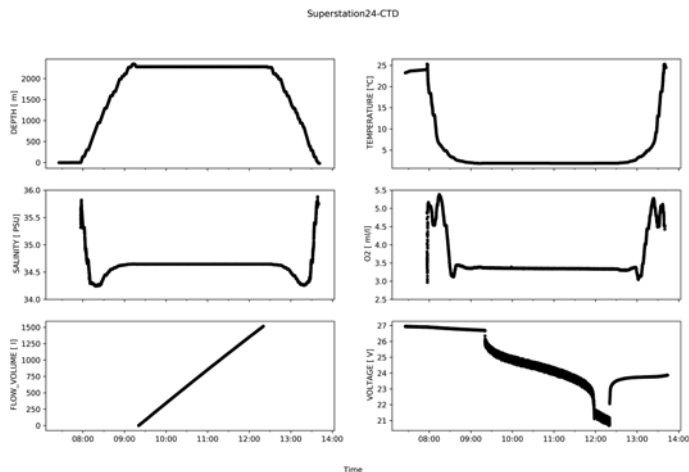


Abb. 9: Beispiel eines erfolgreichen Testeinsatzes des „SeaFeather 10k“-Systems mit der Darstellung ausgewählter Messparameter

DANKSAGUNG

Die Projektpartner danken dem Ministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundvorhabens „SeaFeather 10k“ (Förderkennzeichen 03SX480) sowie den Mitarbeitern des Projektträgers Jülich für die administrative Betreuung des Vorhabens.

RETROLADUNG –

LAGEBILDOPTIMIERUNG FÜR MARITIME AWARENESS

AUTOREN

FLORIAN EBERL	CARTESY GMBH
JOSEF FEMBÖCK	CARTESY GMBH
GYDE ANDRESEN-PAULSEN	TUHH-INSTITUT FÜR KONSTRUKTION UND FESTIGKEIT VON SCHIFFEN
SIMON HABERL	TUHH-INSTITUT FÜR KONSTRUKTION UND FESTIGKEIT VON SCHIFFEN
OLE DETLEFSEN	TUHH-INSTITUT FÜR FLUIDDYNAMIK UND SCHIFFSTHEORIE
SÖREN EHLERS	TUHH-INSTITUT FÜR KONSTRUKTION UND FESTIGKEIT VON SCHIFFEN
MOUSTAFA ABDEL MAKSOU	TUHH-INSTITUT FÜR FLUIDDYNAMIK UND SCHIFFSTHEORIE
CARL REINER	TUHH-INSTITUT FÜR FLUIDDYNAMIK UND SCHIFFSTHEORIE
CORDULA AHLERS	MEC CONTAINER SAFETY SYSTEMS GMBH
LENNART HORSTMANN	MEC CONTAINER SAFETY SYSTEMS GMBH

EINLEITUNG

Jedes Jahr gehen mehrere tausend Container auf See verloren. Neben Verlusten in Millionenhöhe birgt dies auch weitere Gefahren: Unter der Wasseroberfläche schwimmende Container stellen ein hohes Kollisionsrisiko für die Schifffahrt dar, austretende Gefahrstoffe können Flora und Fauna empfindlich schädigen. Derzeit werden Laschbrückensysteme in unterschiedlichen Konstruktionen und Ausführungen verwendet. Diese Art der Ladungssicherung bringt einen enormen Aufwand an Laschmaterial und Arbeitsstunden mit sich. Hauptziel des Verbundvorhabens Retroladung ist daher die Entwicklung modularer Zellgerüstsysteme als effiziente und zuverlässige technische Lösung zur Ladungssicherung auf bemannten/unbemannten und unmotorisierten/motorisierten Schiffen. Die Zellgerüste fungieren dabei als Schienensystem, in dem die Container gestaut werden und so die Sicherung der Container ohne aufwendige Lascharbeiten und ohne den Einsatz von zusätzlichem Laschmaterial ermöglichen. Um die Transportkapazität bestmöglich auszunutzen, liegt der Fokus der Entwicklungsarbeiten in der Gewichtsoptimierung der Gesamtkonstruktion. Die dafür benötigten betriebsspezifischen Dimensionierungslasten werden durch numerische Simulationen ermittelt. Die Zellgerüste verfügen über integrierte Sensornetzwerke, die eine kontinuierliche Überwachung der Ladung und des Schiffsbetriebs erlauben. In Kombination mit KI- und datenbasierten Auswerte- und Prognoseverfahren, z.B. um basierend auf Wellen- und Satellitenwetterdaten die Belastungen in den nächsten Stunden vorherzusagen, kann so die operative Sicherheit des Schiffsbetriebs erhöht werden. Zur Reduzierung des Installations-

aufwands, insbesondere für die Verwendung der Zellgerüste als Retrofitlösung, werden adaptive Decksrahmen entwickelt, die eine Installation der Zellgerüste über Deck ohne schwere und aufwendige Versteifungen im Hohlraum des Schiffskörpers ermöglichen.

Die Verwendung der in Retroladung entwickelten Zellgerüste kann die Anzahl der über Bord gehenden Container signifikant reduzieren. Höhere Containergewichte ermöglichen eine effizientere Ausnutzung der Transportkapazität der Schiffe und können so zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen beitragen.

2. METHODENENTWICKLUNG ZUR SIMULATIONSBASIERTEN LASTERMITTLUNG

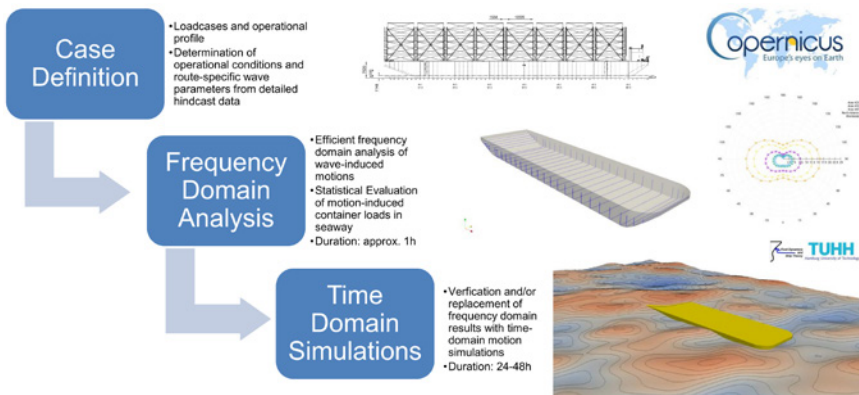


Abb. 1: Ablaufschema der Prozesskette zur simulationsbasierten Lastermittlung

Zur initialen Auslegung und strukturellen Optimierung der Zellgerüststrukturen wurde ein effizienter mehrstufiger Berechnungsprozess entwickelt, um die Belastungen auf die Containerstauerüste anhand operations- und routenspezifischer Bewegungssimulationen zu ermitteln. In Abb. 1 sind die Stufen des Berechnungsprozesses dargestellt:

- › Zunächst müssen die Betriebsszenarien der Schiffseinheiten definiert werden, insbesondere in Bezug auf kritische Ladefälle und mögliche Fahrtrouten und Betriebsprofile. Außerdem werden routenspezifische Wellenparameter für die Simulationen bestimmt. Dafür werden frei verfügbare Hindcast-Daten aus dem COPERNICUS-Erdobservationsprogramm der EU verwendet, das u. a. detaillierte Seegangsbeschreibungen bei hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zur Verfügung stellt.
- › Anschließend wird das Bewegungsverhalten des Schiffes im Frequenzbereich analysiert und statische Kennwerte der Beschleunigungen an den Containerstaplätzen in den entsprechenden Seegängen ermittelt. Hierfür kann z.B. die Streifenmethode PDSTRIP verwendet werden, die einen geringen Modellierungsaufwand zur Erfassung der Schiffsgeometrie erfordern.

- › Bei zu erwartenden starken Schiffsbewegungen werden ergänzende Simulationen im Zeitbereich durchgeführt.

Dafür wird das Verfahren IMPRES verwendet. Zur Modellierung der hydrodynamischen Kräfte durch Impulsantwortfunktionen wird dabei auf Ergebnisse der linearen Berechnungen im Frequenzbereich zurückgegriffen. Wichtige nichtlineare Effekte werden direkt im Zeitbereich berücksichtigt und erlauben so eine realistische Abbildung der Schiffsbewegungen.

2.1. ROUTENSPEZIFISCHE SEEGANGSPARAMETER

Zur Ermittlung detaillierter routenspezifischer Wellenparameter werden Hindcastdaten der Wetterdatenbank Global Ocean Waves Reanalysis WAVERYS verwendet. Die Datenbank liefert statistische Seegangparameter wie signifikante Wellenhöhe, Nullaufwärtsperiode und Wellenrichtung. Da die genaue Fahrtroute der Barge nicht bekannt ist, wird sie als gerade Verbindung zwischen dem Start- und Zielhafen mit einer zufälligen Abweichung senkrecht zum direkten Kurs von 2% der Gesamtstrecke approximiert. Das entstehende Band möglicher Positionen ist in Abb. 2 dargestellt. Innerhalb dieser räumlichen und zeitlichen Begrenzungen werden anhand der WAVERYS-Datenbank routenspezifische Langzeitstatistiken erzeugt. Die Auswertung der Daten zeigt, dass die im Bereich der Fahrtroute zu erwartenden Seegänge im Vergleich zu den Seegängen im gesamten Nordatlantik nach DNV-RP-C205 deutlich milder sind. Im Durchschnitt weisen beispielsweise die 5 % der schwersten Seegänge eine signifikante Wellenhöhe von 4,141 m im Fall der routenspezifischen Langzeitstatistik und von 7,03 m im Fall des Nordatlantiks auf.



Abb. 2: Darstellung der möglichen Bargepositionen bei der Ermittlung routenspezifischer Seegangparameter

2.2. BEWEGUNGSSIMULATION ZUR LASTERMITTLUNG

Mit den ermittelten Wellenparametern werden anschließend Bewegungssimulationen im Frequenz- und Zeitbereich durchgeführt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die auftretenden Beschleunigungen bei routenspezifischen Seegangparametern im Vergleich zu den Ergebnissen für Fahrt im Nordatlantik deutlich kleiner sind. In Abb. 3 sind die signifikanten Beschleunigungsamplituden am oberen Backbordcontainer in der ersten Container-Bay dargestellt. Bei Verwendung von routenspezifischen Seegangparametern sind die Beschleunigungen im Mittel um ca. 50% reduziert. Für die Längsbeschleunigungen zeigen die Simulationsergebnisse mit PDSTRIP im Frequenzbereich und IMPRES im Zeitbereich identische

Ergebnisse. Für die Querschleunigungen zeigen die IMPRES-Simulationen bei seitlichen Begegnungswinkeln geringfügig höhere signifikante Beschleunigungsamplituden als die PDSTRIP Ergebnisse. Die Unterschiede sind hauptsächlich auf nichtlineare Einflüsse bei der Modellierung der Rollbewegung zurückzuführen, die in IMPRES mitberücksichtigt werden. Aufgrund der höheren Begegnungsfrequenz zeigen sich die größten signifikanten Vertikalbeschleunigungsamplituden in vorderlichen Wellen. Aufgrund der linearisierten Euler-Transformationsmatrix, die in PDSTRIP verwendet wird, sind die im Frequenzbereich ermittelten vertikalen Beschleunigungen etwas geringer als bei IMPRES. Dabei werden die nichtlinearen Transformationsanteile, z. B. aus der Stampfbewegung, in der Vertikalbeschleunigung berücksichtigt. Insgesamt bilden die Simulationsergebnisse beider Verfahren das dynamische Bewegungsverhalten in dem betrachteten Anwendungsfall plausibel und zuverlässig ab.

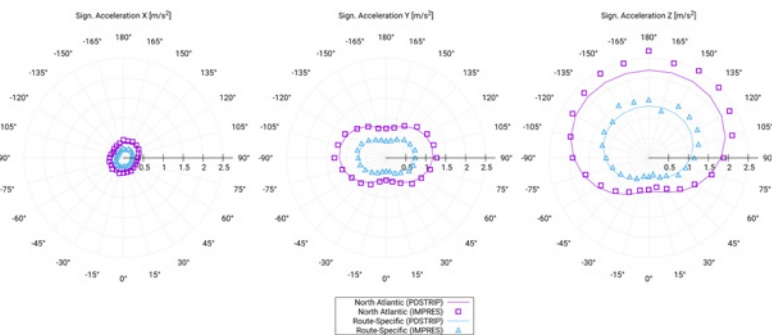


Abb. 3: Signifikante Beschleunigungsamplituden über Wellenbegegnungswinkeln am oberen Backbordcontainer der ersten Container-Bay

Die verringerten Beschleunigungen an den Containerstauplätzen resultieren in einer deutlichen Reduktion der Dimensionierungslasten. Abb. 4 zeigt die ermittelten bewegungsabhängigen Belastungen auf die Container in der ersten Bay am Bug der Barge. Bei Verwendung routenspezifischer Seegangsparemeter können die Querkräfte um ca. 60% verringert werden, die Vertikalkräfte werden um ca. 25% gegenüber den Simulationsergebnissen für Fahrt im gesamten Nordatlantik nach DNVGL reduziert.

Die Verwendung von Langzeitstatistiken des Seegangs, die detailliert an das Operationsprofil und Einsatzgebiet der Barge angepasst sind, ermöglichen eine deutliche Reduktion der Lastannahmen und damit leichtere Konstruktionen als nach standardmäßiger Befolgung der DNVGL-Richtlinien. Durch die Integration von Bewegungssensoren in die Zellgerüste und entsprechende Monitoring- und Decision-Support-Systeme kann sichergestellt werden, dass die Lastannahmen auch im tatsächlichen Schiffsbetrieb nicht überschritten werden.

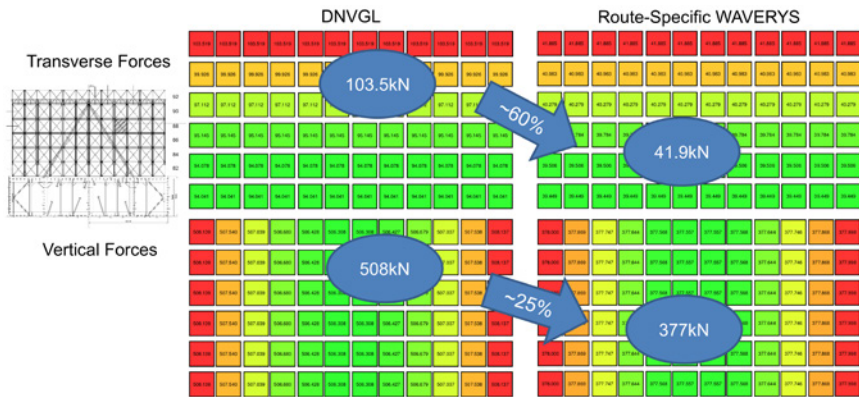


Abb. 4: Ermittelte Containerlasten basierend auf Bewegungssimulationen mit routenspezifischen (rechts) und verallgemeinerten (links) Seegangsdaten

3. MODELLVERSUCHE

Zur Erprobung des Datenübertragungsprotokolls sowie der Messelektronik der Sensoren im Vorfeld der geplanten Großausführungsmessungen wurden Beschleunigungssensoren in einer miniaturisierten Ausführung entwickelt. Die gesammelten Daten werden außerdem zur Ermittlung der Prognosegenauigkeit der verwendeten Simulationsverfahren eingesetzt.

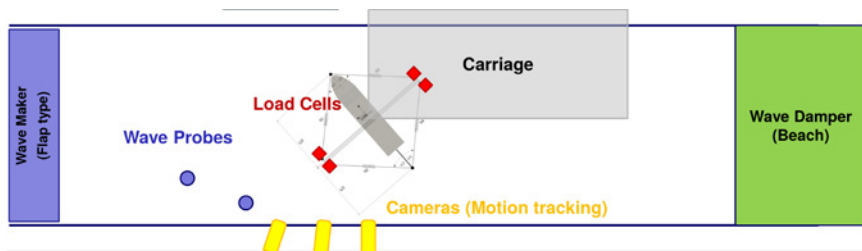


Abb. 5: Versuchsaufbau im Schleppkanal zur Bewegungsmessung in Wellen

Der Versuchsaufbau im Schleppkanal ist in Abb. 5 dargestellt. Neben den an Bord installierten Beschleunigungssensoren wurden die Bewegungen über ein kamerabasiertes Messsystem erfasst. An einem Tankende befindet sich ein Klappenwellenerzeuger, am gegenüberliegenden Ende des Tanks ist ein Strand zur Dämpfung der Wellen installiert.

3.1. LABORERPROBUNG DES ENTWICKELTEN SENSORSYSTEMS

Das Messsystem besteht aus mehreren drahtlosen Bewegungssensoren, die die translatorischen Beschleunigungen in drei Achsen und die Drehraten um diese Achsen messen. Die drahtlosen Sensoren wurden an fünf Stellen auf dem Modell installiert. Abb. 6 zeigt das Modell während einer Bewegungsmessung in irregulären Wellen.

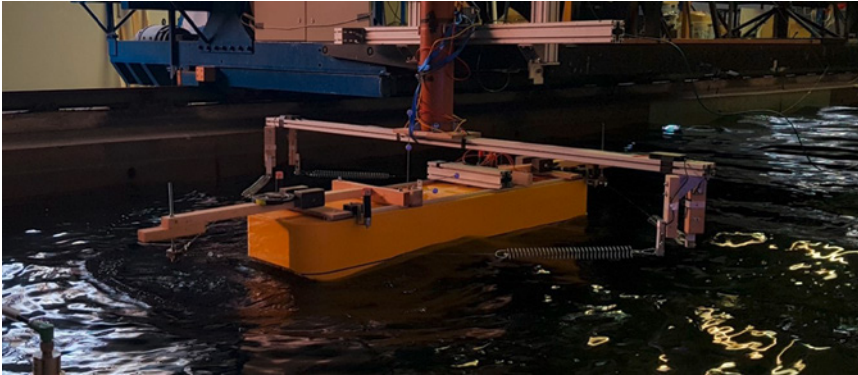


Abb. 6: Das im Federrahmen eingespannte Modell.

Während der Versuche erwies sich das Messsystem als sehr zuverlässig.

Die Redundanz der Bewegungsmesssysteme ermöglicht eine Verifikation der Messdaten der Sensoren zur Bestimmung der Schiffsbewegung. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass eine gute Vergleichbarkeit zwischen den beiden Messsystemen besteht. Abb. 7 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus einem Versuch in irregulärem Seegang. Die blaue Kurve zeigt das Mittel aller fünf Messungen, das auf das Koordinatensystem des Kamerasystems umgerechnet wurde. Die rote Kurve zeigt die Messungen des Kamerasystems. Es treten nur sehr kleine Abweichungen zwischen den beiden Systemen auf, die innerhalb des Toleranzbereichs des Referenzmesssystems liegen.

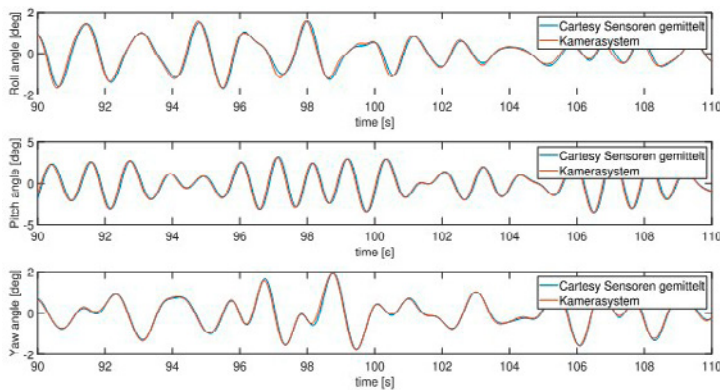


Abb. 7: Ausschnitt der gemessenen Rotationsbewegungen in irregulärem Seegang mit Begegnungsrichtung 150° , entsprechend einer signifikanten Wellenhöhe von $5,76\text{m}$

3.2. VERGLEICH VERSUCHS- UND SIMULATIONSERGEBNISSE

Zur Validierung der verwendeten und weiterentwickelten numerischen Methoden wurden die Übertragungsfunktionen aus den Modellversuchen den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt. In Abb. 8 sind exemplarisch die Übertragungsfunktionen der Barge in schräg-

laufenden Wellen dargestellt. Hierbei zeigen sich bis auf die Rollbewegung ebenfalls gute Übereinstimmungen zwischen den Versuchs- und Simulationsergebnissen beider numerischer Verfahren. Aufgrund der linearen Modellierung der Rolldämpfung wird die Rollbewegung mit PDSTRIP insbesondere im Bereich der Rollresonanz signifikant überschätzt. Mit dem nichtlinearen Rolldämpfungsansatz in IMPRES können auch die Rollbewegungen realistisch abgebildet werden. Vergleiche bei anderen Begegnungswinkeln zeigen ebenfalls gute Übereinstimmungen zwischen Experiment und Simulation.

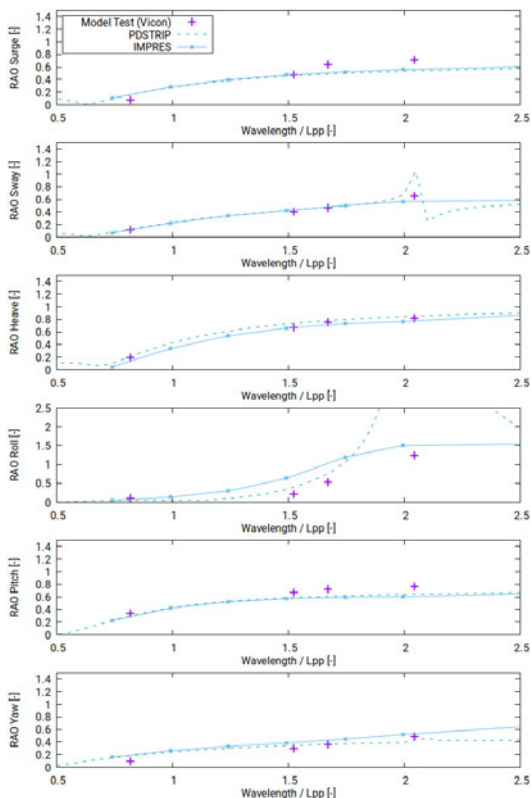


Abb. 8: Vergleich der Übertragungsfunktionen der Bergenbewegungen zwischen Versuchs- und Simulationsergebnissen in schräglaufenden Wellen (Begegnungswinkel 135°)

4. ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG EINES ADAPTIVEN UND FLEXIBLEN ZELLGERÜSTKONZEPTS

4.1. STRUKTUROPTIMIERUNG

Die Zellgerüste sollen hinsichtlich Gewicht, Fertigungskosten und Betriebsfestigkeit optimiert werden. Ziel ist es, ein parametrisches Verfahren zur Dimensionierung und Optimierung von Zellgerüsten zu entwickeln. Die parametrische Optimierung des Zellgerüsts wird unter Berücksichtigung der Containerlast sowie der Umweltlasten durchgeführt. Hier wird ein besonderes Augenmerk auf die Gewichtsreduzierung der Stahlstruktur gelegt, wobei als weiteres Krite-

rium die Einhaltung der Betriebsfestigkeitsanforderungen gilt. Die Barge soll über ihre Lebensdauer hinweg den Betriebslasten standhalten, ohne eine überdimensionierte Stahlstruktur aufzuweisen, welche mit unnötigem Gewicht und evtl. nicht nötigen und kostenintensiven Schweißarbeiten verbunden wäre.

Im ersten Schritt wurden die wirkenden Kräfte auf die zu entwickelnde Struktur und deren Lagerung analysiert und festgelegt, um die Größe des numerischen Modells festzulegen. Siehe Abb. 9 und Abb. 10.

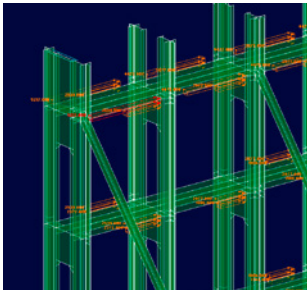


Abb. 9: Querkräfte Zellgerüst

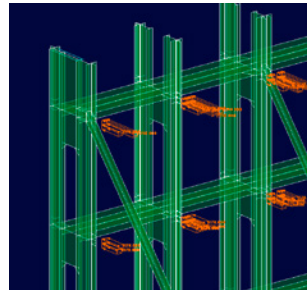


Abb. 10: Längskräfte Zellgerüst

Abb. 11 zeigt auf wie sich das Zellgerüst bei Einwirkung der Längskräfte verformt. Es wird deutlich, dass die maximale Verformung nicht akzeptabel ist.

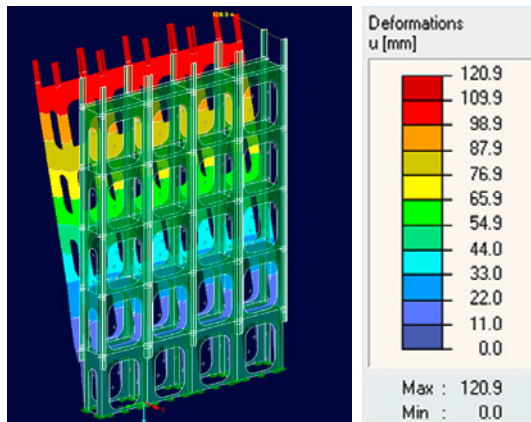


Abb. 11: Zellgerüst mit Längskräften

Zusätzlich erzeugen Längskräfte, die auf das Zellgerüst einwirken, ein Moment, welches auf der untersten Ebene des Gerüsts maximal wird. Dieser Effekt entsteht aus der Verformung im oberen Bereich und der daraus resultierenden Hebelwirkung und führt zu einem starken Anstieg der Spannungen im Fundament des Zellgerüsts.

Um den oben beschriebenen Effekten entgegenzuwirken, wird eine automatisierte Optimierungsmethode entwickelt. Diese Methode besteht grundlegend aus zwei Bausteinen. Zum

einen wird ein parametrisches numerisches Modell entwickelt, welches automatisiert Design-alternativen erzeugt und anschließend einer Strukturanalyse unterzogen wird. Die Ergebnisse werden über eine Schnittstelle an das zweite Element der Methode übergeben: den Optimierungsalgorithmus. Der verwendete Partikel-Schwarm-Algorithmus findet basierend auf den Ergebnissen der Strukturanalyse iterativ die Lösung mit dem geringsten Gewicht, welche dennoch den oben genannten Kriterien (maximal erlaubte Verformung und Spannung) entspricht. Vorteil der voll automatischen Strukturoptimierung ist die effektive Umsetzung verschiedenster Design-alternativen und das damit zusammenhängende große Potenzial, tatsächlich die Lösung mit dem geringsten Gewicht zu finden.

Um die Funktionsweise des Algorithmus darzulegen, werden im Folgenden zwei Effekte genauer betrachtet: Zur Berücksichtigung der Längskräfte hat der Algorithmus diagonale Stützen, welche kreuzweise das Ende der Zellgerüste mit dem Deck verbinden, umgesetzt. Abb. 12 zeigt, wie sich die Längskräfte mit den Stützen verteilen. Hier wird deutlich, dass die Verformung des Zellgerüsts deutlich geringer ist, was dazu führt, dass sich die maximale Kraftauswirkung auf die untere Ebene erheblich verringert. Zusätzlich kann die Dimensionierung der Zellgerüste durch das Hinzufügen der Stützen schmaler konzipiert werden, was wiederum zu einer erheblichen Gewichtseinsparung führt.

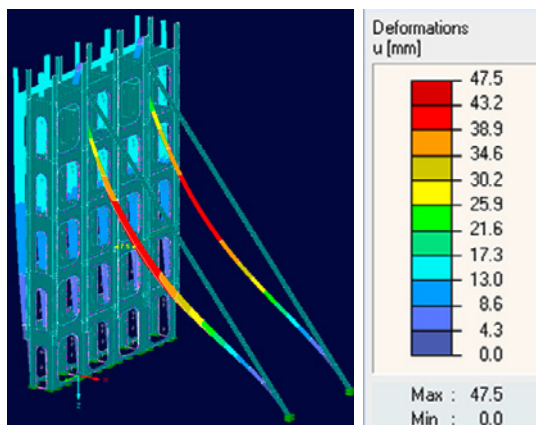


Abb. 12: Zellgerüst mit wirkenden Längskräften und implementierten Stützen

Beim Betrachten der Gesamtkonstruktion mit den integrierten Stützen unter Berücksichtigung der einwirkenden Längs- und Querkräfte, ist zu erkennen, dass eine akzeptable Gesamtverformung erreicht wird. Siehe Abb. 13

Zusätzlich werden die Kosten der Struktur unter Berücksichtigung der Materialkosten sowie der Schweißarbeiten und der damit verbundenen Verbrauchskosten erstellt. Es wird also eine pareto-optimale Struktur mit maximaler Tragfähigkeit entwickelt, welche dann der Betriebsfestigkeitsanalyse unterzogen werden kann.

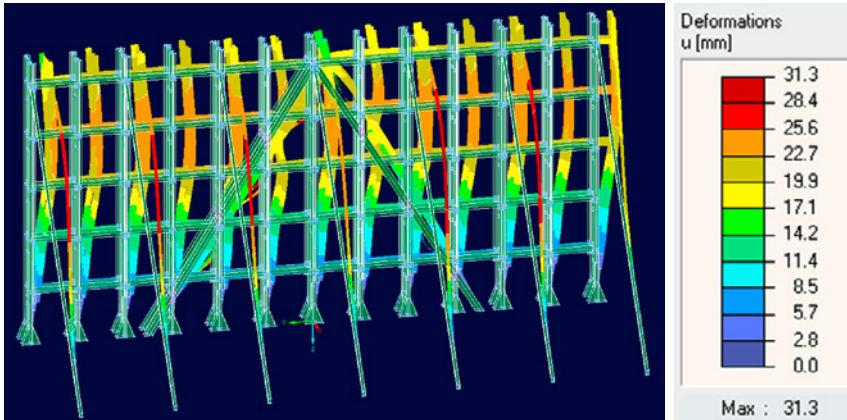


Abb. 13: Verformung bei der Gesamtkonstruktion mit einwirkenden Längs- und Querkraften

Maßgeblich für die Betriebsfestigkeitsanalyse sind auftretende Spannungen und deren Häufigkeit an kritischen Stellen, hier den Schweißnähten. Diese werden an den markierten Schweißdetails ausgewertet.

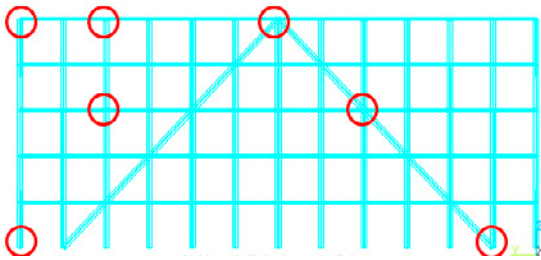


Abb. 14: Verbindungen des Zellgerüsts

Wird an mindestens einem Detail die Lebensdauer unterschritten, muss das Modell verändert werden und der Optimierungsalgorithmus startet erneut mit der optimalen Auslegung der Struktur im Sinne der Tragfähigkeit.

Im nächsten Schritt werden die Details ausgeschnitten und separat modelliert.

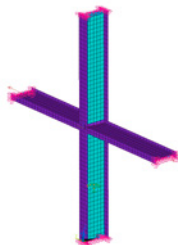


Abb. 15: Beispielhaftes Detailmodell einer Kreuzverbindung

Mittels dieser Detailmodelle wird eine umfassende Strukturanalyse durchgeführt. Werden Fehler oder Mängel aufgedeckt, startet der Optimierungsalgorithmus erneut.

Neben den Betriebs- und Umweltlasten üben die Containerstapel vertikale Kräfte aus, sodass das Fundament der Zellgerüste nicht als feste Einspannung angenommen werden kann. Daher werden neben den Zellgerüsten zusätzlich deren Befestigung und das darunterliegende Deck mit modelliert, siehe Abb. 16.

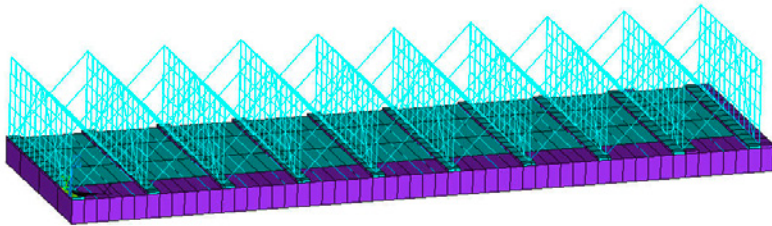


Abb. 16: Deck und Zellgerüste

Um die lateralen Kräfte und die Biegemomente aus den Zellgerüsten aufzunehmen, werden Rahmen auf dem Deck vorgesehen. Diese speziell entwickelten Decksrahmen dienen dazu, die wirkenden Kräfte der Container und des Zellgerüstes auf die Rumpfstruktur zu übertragen.

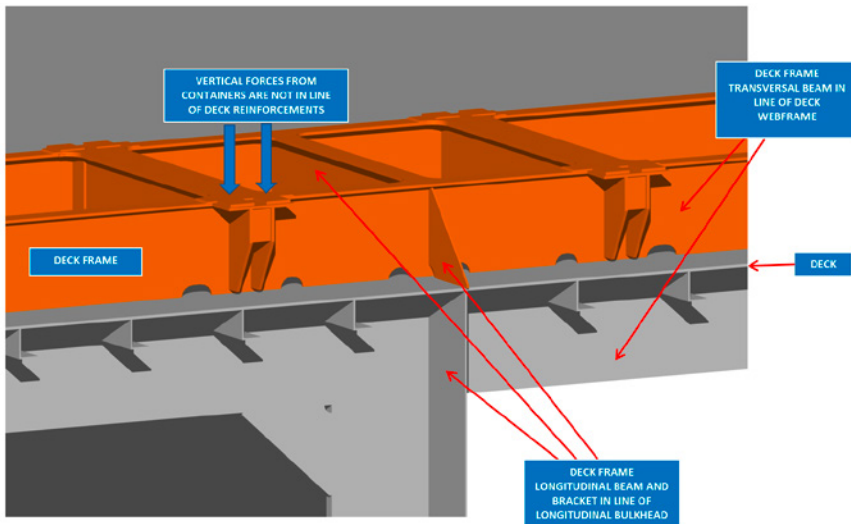


Abb. 17: Decksrahmen

Die Decksrahmen können an Land vorgefertigt werden und anschließend an Deck verschweißt werden.

4.2. LASTERMITTLUNG

Durch die Verwendung von Zellgerüsten wird jeder Container seitlich abgestützt, was dazu führt, dass die einwirkenden Kräfte reduziert werden. So können schwere Container wie bei der Sicherung mit herkömmlichen Lasch Equipment (Twistlocks, Spannschrauben und Laschstangen) geladen werden. Siehe hierzu die unten aufgeführte Berechnung des Stapelgewichtes, Abb. 18 ohne und Abb. 19 mit Zellgerüsten.

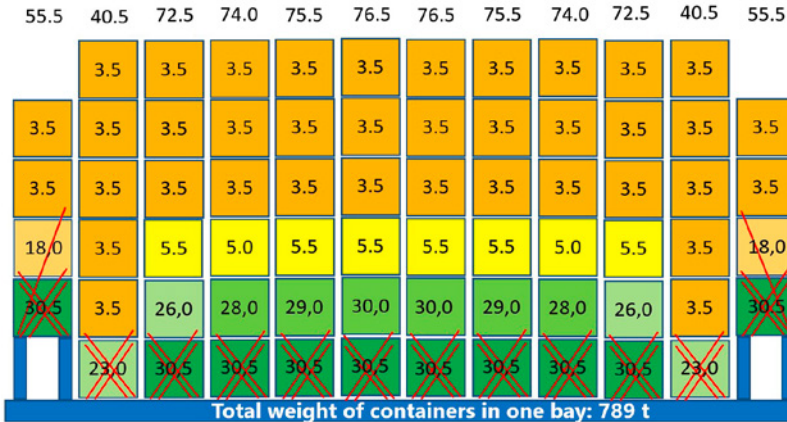


Abb. 18: STACK WEIGHT DISTRIBUTION WITH LASHING BRIDGES

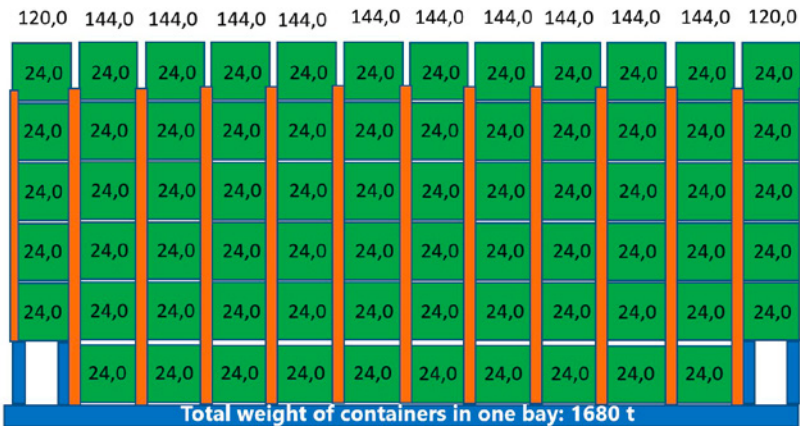


Abb. 19: STACK WEIGHT DISTRIBUTION WITH CELL GUIDES

Diese Kalkulation des Stapelgewichtes verdeutlicht, dass eine 100% höhere Stapelbelastung und deutliche Verlagerung von schweren Containern auf die obere Schicht stattfindet.

4.3. FUNKTIONSWEISE VON DECKSRAHMEN UND ZELLGERÜSTEN

Auf Basis der vorher genannten Auswertungen ist das in Abb. 20 dargestellte Zellgerüst entstanden.

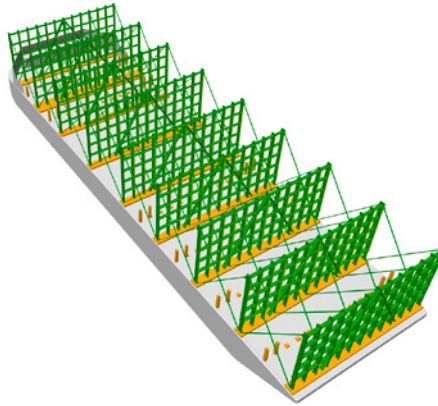


Abb. 20: Darstellung Zellgerüste auf der Barge

Die Zellgerüste bestehen aus einer Laschbrücken-ähnlichen Konstruktion, an welcher Führungsschienen installiert sind. Mit diesen Führungsschienen werden die Container in der richtigen Position platziert. An der Außenkante wird etwas Abstand gehalten, um einen Laufgang frei zu lassen.

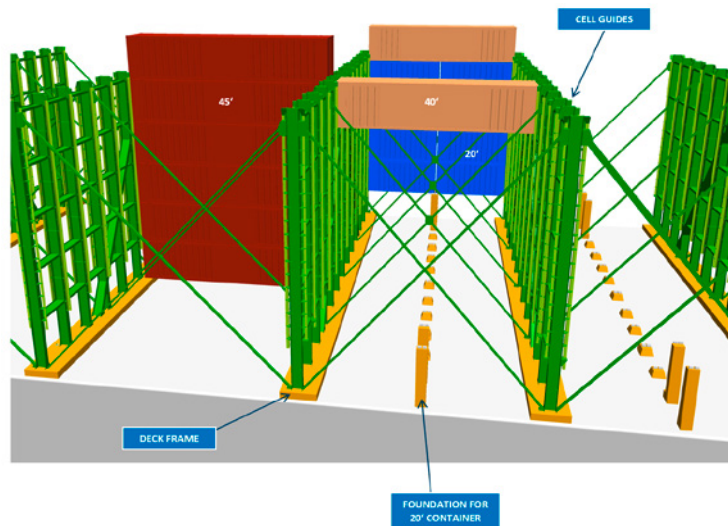


Abb. 21: Zellgerüste auf einer Barge

Es können 20'-,40'- sowie 45'-Container geladen werden.

Bei der 40'-Variante befinden sich an Deck zwischen den Zellgerüsten Fundamente und Stützen, damit hier auch 20'-Container geladen werden können.

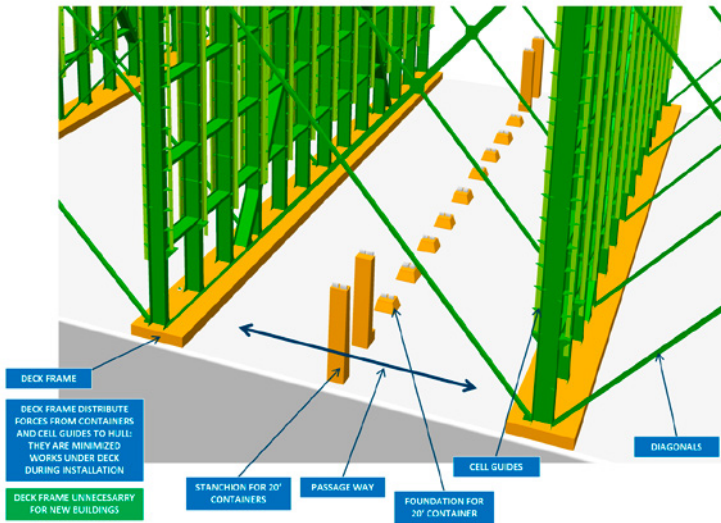


Abb. 22: Exemplarischer Aufbau

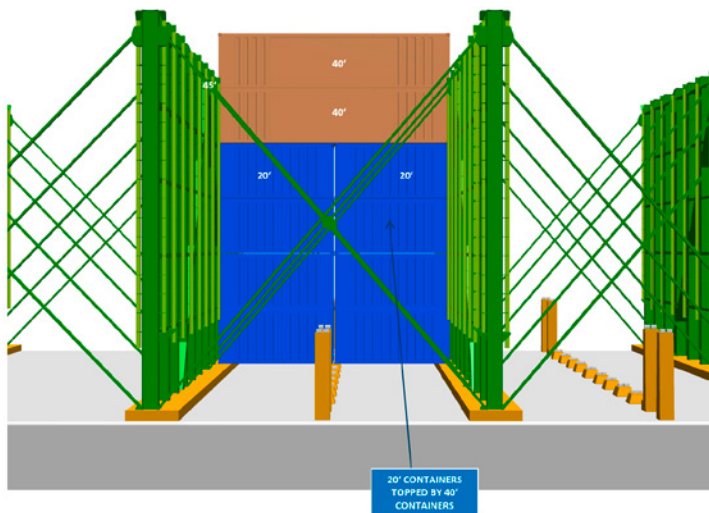


Abb. 23: Gemischte Stauung von 20' und 40' Containern in Zellführungen

Bei der 45°-Variante können auch 40'-Container geladen werden.

Hierfür wurden Adapter entworfen, siehe Abb. 24. Sie werden an Land an die 40'-Container montiert.

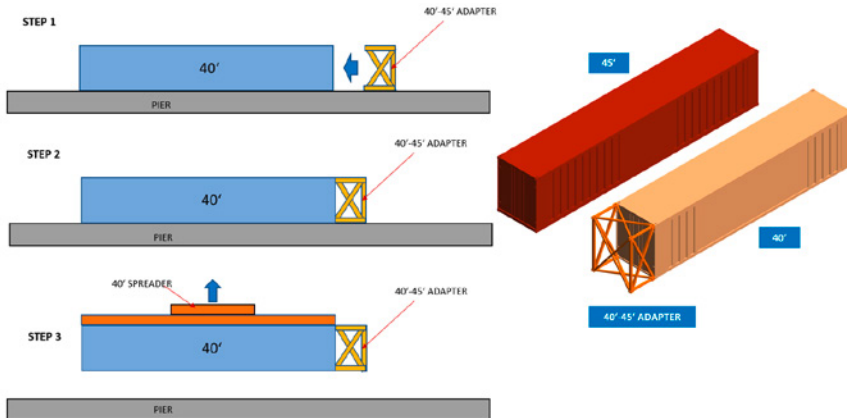


Abb. 24: Adapter für 40'-Container

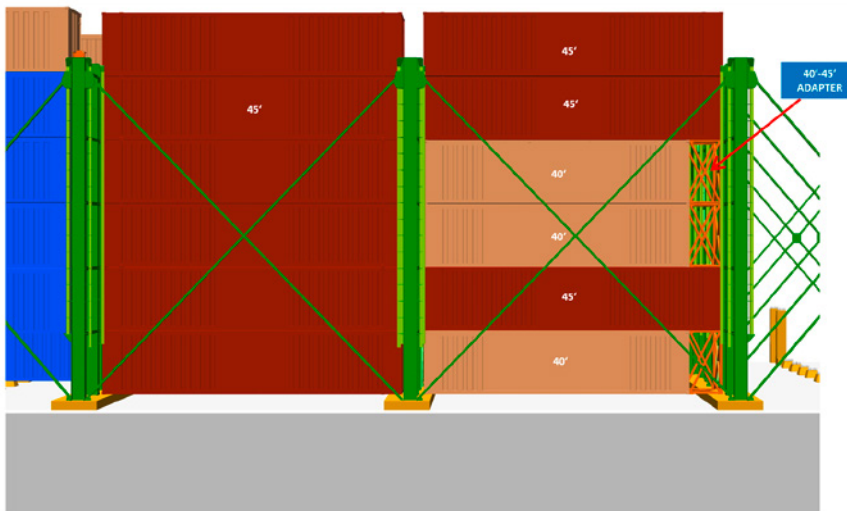


Abb. 25: Stauung von 40'-Container in 45'-Zellgerüst

5. ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG EINES KONZEPTS ZUR INTERGRATION EINES SELBSTORGANISIERENDEN, ENERGIEAUTARKEN KABELLOSEN SENSORNETZWERKS

5.1. SENSORENTWICKLUNG

Um sowohl Roh- als auch Ergebnisdaten von einigen wenigen bis zu mehreren hundert Sensoren zeitsynchron zu übertragen, wurde bei der Konzeption auf ein flexibles und skalierbares Messsystem gesetzt.

5.2. SYSTEMKONZEPT UND AUFBAU

Das Messsystem besteht aus einer Datenzentrale (DZ) und mindestens 1 bis maximal 255 Sensoren (S). Jeder Sensor synchronisiert sich mit dem internen Takt der Datenzentrale und

liefert zyklisch Ergebnis- und Statusdaten zurück. Die Sensoren unterstützen mehrere Messmodi, die durch die Datenzentrale konfiguriert werden. Neben der Ausgabe von Rohdaten können so aufbereitete und vom Sensor intern bewertete Ergebnisdaten der Messung angefordert werden. Durch die Übertragung von Ergebnisdaten sinkt die Anforderung an die Geschwindigkeit der Netzwerkverbindung zu Gunsten der Reichweite und Störsicherheit. Durch die Synchronisation mit der Datenzentrale wird sichergestellt, dass alle Sensoren zum gleichen Zeitpunkt die zu messende physikalische Größe erfassen. Die Abb. 32 zeigt exemplarisch den Messaufbau auf einer Barge.

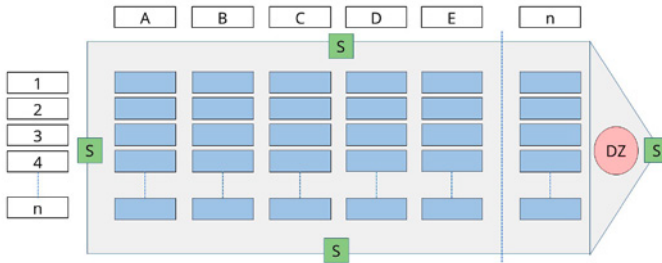


Abb. 26: Messaufbau auf einer Barge

5.3. ZEITSYNCHRONE PARALLELE DATENERFASSUNG UND DATENÜBERTRAGUNG

Jeder einzelne Sensor (-knoten) arbeitet autark und ist entweder über ein drahtgebundenes oder drahtloses Netzwerk mit der Datenzentrale verbunden. Die Kommunikation findet über ein Zeitschlitzverfahren statt. Die Datenzentrale sendet in bestimmten Zeitabständen ein Synchronisationssignal an alle Sensoren, das neben der Synchronisation auch den Zeitschlitz für die Antwort jedes Sensors festlegt.

In diesen Zeitschlitz müssen die Sensoren ihre Anwesenheit zurückmelden. Nachfolgend ist in (Abb. 27), der Synchronisationsimpuls der Datenzentrale rot markiert. Der interne Zähler eines jeden Sensors, welcher sich bei jedem Synchronisationsimpuls zurückstellt, ist grün dargestellt. Basierend auf diesem Zeitintervall werden die gesamte Peripherie, wie z. B. der A/D-Wandler des Mikrocontrollers, als auch das interne Programmtiming und der Sleepmodus gesteuert. Jeder Sensor ermittelt autark seine Messdaten und legt diese zur Abfrage mit Zeitstempel ab. Im Datensatz können, neben dem internen Betriebsmodus, weitere Informationen wie Energiestatus, die Übertragungsqualität, Temperatur, Schaltzustände etc. übertragen werden.

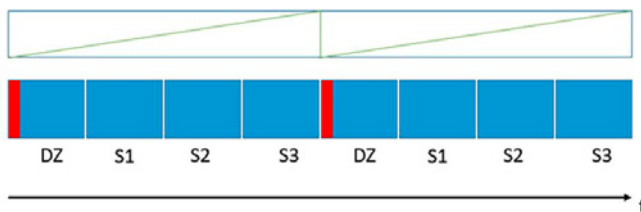


Abb. 27: Skizze Zeitschlitzprotokoll

5.4. AUFBAU EINES SENSORKNOTENS

Der Sensor ist in ein modulares, wasserdichtes Gehäuse integriert und enthält je nach Ausführung die entsprechenden Funktionsgruppen, wie z.B. eine „IMU – Inertia Measurement Unit“ zur Messung von Bewegungen. Optional können eine induktive Energie-Einkopplung, ein RS-485 Datenbusanschluss für weitere Unterbaugruppen, ein DMS-Sensoreingang sowie ein Erweiterungsspeicher integriert werden. Ein Sensorknoten kann als Einzelsensor oder als Unterverteiler einer Sensorgruppe agieren. Die Anbindung an die Datenzentrale erfolgt per Funk- oder per Kabelverbindung.

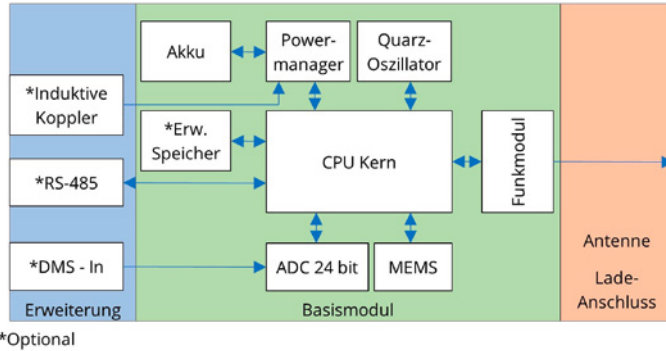


Abb. 28: Schematischer Aufbau des Sensorknotens

5.5. ENTWICKLUNG UND BAU VON SENSOREN FÜR DIE DATENMESSUNG

Im Rahmen dieses Projekts wurden Sensoren entwickelt und produziert, die reale Bewegungsdaten auf einer mit Laschbrücken ausgestatteten Barge, welche Container im Atlantischen Ozean transportiert, aufzeichnen. Diese werden später für 3-D-Simulationen verwendet, um hiermit dann die Modellversuche durchzuführen.

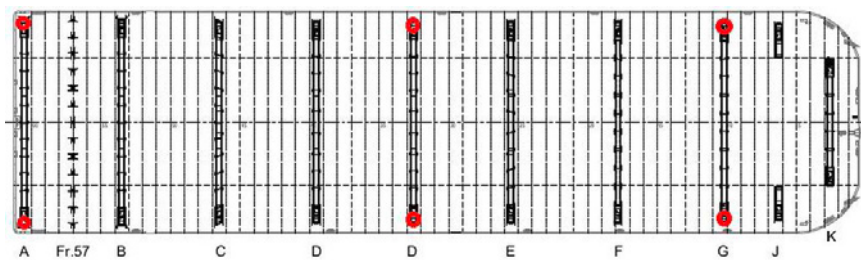


Abb. 29: Position der Datenlogger auf der Barge

Jeder Datenlogger zeichnet die auf ihn wirkenden Beschleunigungen, Drehraten und Kompassdaten in jeweils 3 Achsen auf einen internen Speicher auf. Durch das Anbringen der Datenlogger an den Laschbrücken wird eine direkte Sichtverbindung untereinander durch die Container verhindert und somit eine Synchronisation der Sensoren untereinander über ein

Funknetzwerk stark beeinträchtigt. Die Synchronisation der Datenlogger erfolgt über ein GNSS, da die Sichtverbindung nach oben durch die Ladung nicht versperrt ist. Die Möglichkeit zur Synchronisation über ein Sub-GHz Netzwerk wurde mithilfe eines im Datenlogger eingebauten Funkmoduls zusätzlich erforscht.

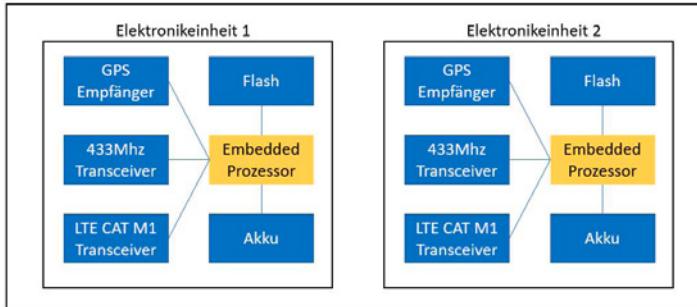


Abb. 30: Schematischer Aufbau eines Datenloggers

Die Elektronik innerhalb eines jeden Datenloggers ist redundant ausgeführt und befindet sich in einem Gehäuse, welches den rauen Witterungsbedingungen und möglichen Kräfteinwirkungen durch Laschmaterial widersteht. Jeder Datenlogger überträgt die intern gespeicherten Messdaten über das LTE CAT-M1 Mobilfunknetz auf einen Server in Deutschland, sobald er sich in Reichweite einer geeigneten Mobilfunk-Basisstation befindet. Die Übertragung der Messdaten bereits während des Erprobungszeitraums ermöglicht eine frühzeitige Auswertung der empfangenen Daten.

6. KI-BASIERTE ASSISTENZSYSTEME

Die Zellgerüste werden über Sensoren verfügen, die kontinuierlich die Schiffsbewegungen erfassen. Um diese Messdaten für den Schiffsbetrieb nutzbar zu machen, werden Monitoring- und Assistenzsysteme entwickelt. Anhand dieses Echtzeitlagebildes kann der aktuelle Betriebszustand des Schiffes bewertet, mögliche Gefahrensituationen frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Damit wird sichergestellt, dass die zulässigen Belastungen der Zellgerüste eingehalten und damit Containerverluste vermieden werden.

Zur Identifizierung der vorherrschenden Seegangparameter wurde ein numerisches Modell entwickelt, das auf künstlicher Intelligenz basiert. Das Modell erfasst die Daten der Beschleunigungssensoren an den Zellgerüsten und leitet daraus eine Schätzung des Wellenspektrums ab. Ist das Wellenspektrum eines Seegangs bekannt, so lassen sich mithilfe effizienter Simulationsverfahren Echtzeitprognosen der bevorstehenden Schiffsbewegungen treffen. Dies ermöglicht die rechtzeitige Identifikation möglicher Risiken, sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen. Der entwickelte Seegangsschätzer bildet somit die Grundlage für ein intelligentes Assistenzsystem.

Die Schätzung des Seegangs erfolgt in zwei Stufen, Abb. 31 visualisiert den Datenfluss bei der Schätzung des Seegangs. In der ersten Stufe dienen die Beschleunigungen der Roll-,

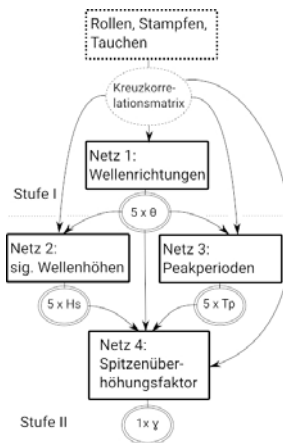


Abb. 31: Netzwerkarchitektur des KI-basierten Seegangsschätzers

Stampf-, und Tauchbewegung als Eingabewert für das erste neuronale Netz (Netz 1), welches die Richtungen ermittelt, die hinsichtlich der Verteilung der Wellenenergie dominieren. Die zweite Stufe der Wellenschätzung durchläuft drei neuronale Netze (Netze 2-4). Dabei werden die signifikanten Wellenhöhen, Modalperioden und Spitzenüberhöhungsfaktoren für die zuvor geschätzten dominanten Wellenrichtungen ermittelt. Bei ausreichender Anzahl an dominanten Wellenrichtungen entsteht so ein zweidimensionales Wellenspektrum, das die Verteilung der Seegangenergie über die Wellenrichtungen und Wellenfrequenzen darstellt. Ein Beispiel für ein zweidimensionales Wellenspektrum, das aus fünf eindimensionalen Wellenspektren erzeugt wurde, ist in Abb. 32 dargestellt.

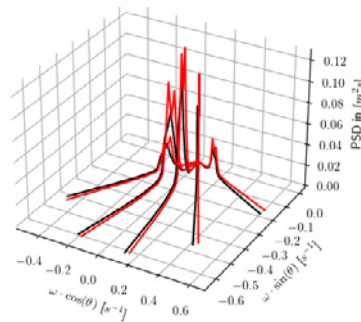


Abb. 32: Beispiel eines geschätzten Seegangsspektrums (Schätzung rot, Grundwert schwarz)

Für das Training des Seegangsschätzers wurden 7500 numerische Simulationen einer Barge in zufälligen Seegängen durchgeführt. Die so generierten Trainingsdaten enthalten die Beschleunigungen mit den zugehörigen Seegangparametern (dominante Wellenrichtungen, signifikante Wellenhöhen, Modalperioden und Spitzenüberhöhungsfaktoren). In Abb. 33 ist der relative Fehler der geschätzten signifikanten Wellenhöhe aufgetragen. Mit einer durchschnittlichen Abweichung von 8,7% erreicht der Seegangsschätzer den gleichen Genauigkeitsbereich wie den von Wellenbojen.

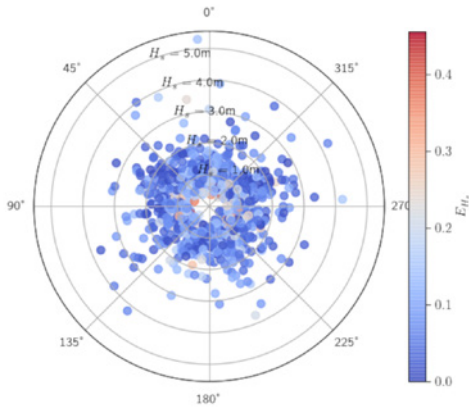


Abb. 33: Relativer Fehler der geschätzten sign. Wellenhöhe

ZUSAMMENFASSUNG

Innerhalb des Projektkonsortiums, bestehend aus MEC Container Systems, Cartesy und der TU Hamburg, wurden technologische Lösungen entwickelt, die es Reedereien ermöglichen, modulare Zellgerüstsysteme zur Sicherung der Ladung wirtschaftlich zu nutzen. Nachdem die grundlegenden Verfahren und Entwurfswerkzeuge erarbeitet wurden, wird derzeit die industrielle Anwendung vorbereitet. Die neuartigen, modularen Zellgerüstsysteme sind gewichtsoptimiert und verfügen über integrierte Sensornetzwerke. Entsprechende Auswertesysteme dienen zur Bewertung des Schiffsbetriebs und gegebenenfalls zur Ableitung von Handlungsempfehlungen, um die Risiken in Bezug auf Ladungsverluste zu minimieren. Die entwickelten Zellgerüstsysteme erlauben damit eine optimale Ausnutzung der vorhandenen Transportkapazität bei gleichzeitig erhöhtem Sicherheitsniveau.

DANKSAGUNG

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Verbundvorhabens. Ein besonderer Dank gilt dem Projektträger Jülich für die stets zuvorkommende und kompetente Betreuung des Vorhabens und die gute Zusammenarbeit.

A-SWARM –

AUTONOME ELEKTRISCHE SCHIFFFAHRT AUF WASSERSTRASSEN IN
METROPOLENREGIONEN

AUTOREN

DR.-ING. CHRISTIAN MASILGE	SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT POTSDAM GMBH, PROJEKTLEITUNG
PROF. DR.-ING. TORSTEN JEINSCH	UNIVERSITÄT ROSTOCK
DR. BJÖRN KOLEWE	UNIVERSITÄT ROSTOCK
PROF. DR.-ING. GERD HOLBACH	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
TIM HOLZKI	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
GERALD RYNKOWSKI	VEINLAND GMBH
KLAUS-GÜNTER LICHTFUSS	BEHALA GMBH
DR. CHRISTIAN MEYNE	INFINEON TECHNOLOGIES AG
KAY BIERZYNSKI	INFINEON TECHNOLOGIES AG

1. A-SWARM MOTIVATION UND KONZEPT

Der Verkehrsträger Schiff bietet in vielen Städten bei einer bestehenden Wasserstraßen-Infrastruktur mit geringer Auslastung meist massive freie Kapazitäten für die Verlagerung von Güterverkehren von den überlasteten Straßen aufs Wasser. Hier zu transportierende Güter werden nicht mehr klassische Massengüter sein, sondern wesentlich kleinere Ladungseinheiten in Form von Stückgütern, z.B. Paketen. Um die in der Praxis geschätzte Flexibilität der landgestützten Transporte weitestgehend zu erhalten, muss der Transport auf dem Wasser in entsprechend kleinen Fahrzeugen erfolgen. Ziel des Vorhabens war es, ein Transportsystem zu entwickeln, die Güter mit einem energie günstig gekoppelten Verband von Einzelfahrzeugen (Schwarm) in die Metropole zu bringen, der sich im Zielgebiet aufteilt und dessen Einzelteile individuelle Ziele autonom ansteuern. Von dort aus wird mit landgestützten Kleintransporten die letzte Meile des Verteilverkehrs gewährleistet. Der Antrieb der kleinen schwimmenden Einheiten erfolgt elektrisch und damit lokal emissionsfrei, womit über die Verkehrsverlagerung hinaus den Luftreinhaltungsproblemen und den nächtlichen Lärmproblemen des Lieferverkehrs im urbanen Raum begegnet werden kann.

Die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit muss trotz Straßenverkehrs- und Luftschadstoffentlastung gegeben sein, könnte jedoch im Falle der Notwendigkeit des Vorhaltens einer Besatzung an einem großen Personalkostenanteil scheitern. Ein autonomer Betrieb der schwimmenden Einheiten vermeidet diesen bei kleinen Fahrzeugen überproportional wirkenden Kostenanteil und löst zum anderen das Problem des mangelnden Fachkräfteangebotes.

Ziel des Vorhabens war es, ein System zu schaffen, das ein Abfahren einer zuvor geplanten Trajektorie auf dem stark begrenzten Raum von Flüssen, Kanälen und Schleusen unter Einflüssen wie Strömungen, Untiefen, Wind und Begegnungsverkehr, die besondere Herausforderungen auf den Binnenwasserstraßen darstellen, ermöglicht. Es wurden sowohl die technologischen Anforderungen an das Wasserfahrzeug selbst betrachtet, aber auch ob und welche technologischen Anforderungen an die Infrastruktur hinsichtlich Kommunikation und Positionierung bestehen.

Ein weiterer Aspekt ist die Optimierung der Technologie hinsichtlich der Zielgrößen der möglichst genauen Positionierung und des möglichst geringen Einsatzes von infrastrukturellen Mitteln, um perspektivisch weder Verkehrssicherheit noch Marktfähigkeit zu gefährden.

Als Ergebnis des Forschungsprojektes ist eine Technologie entwickelt worden, die den autonomen und decarbonisierten Betrieb von kleineren Wasserfahrzeugen auf Binnenwasserstraßen im Bereich von Ballungsräumen ermöglicht. Die technische Machbarkeit wird durch einen Demonstrator, bestehend aus zwei Versuchsträgern, nachgewiesen, die während des Projektes zur Erprobung der Zusammenführung der genutzten Technologien dienen. Die entwickelten Algorithmen sind selbstverständlich auch für große Binnenschiffe anwendbar.

Erprobt und demonstriert wurden das System in einem Reallabor auf Berliner Wasserstraßen in der Umgebung des Westhafens und dem Hafengebiet selbst. Im Fahrtgebiet sind verschiedenste Uferkonfigurationen, Fahrwassertonnen, Brücken und Schiffsverkehr anzutreffen gewesen.

2. TRANSPORTAUFGABE UND TRAJEKTORIENPLANUNG

Am Beginn des Vorhabens stand eine Analyse der potenziellen zukünftigen Güterströme. Es stellten sich folgende Fragen, die im Zuge des Vorhabens bearbeitet und beantwortet wurden:

- › Was sind relevante Güterarten
- › Wo finden sich in der Metropolregion Berlin für diese Güterarten Quellen und Senken
- › In welchen Mengen entstehen diese Güter und was für zeitliche Anforderungen gibt es für diese Güter

Als Ergebnis dieser Untersuchungen sind Verlagerungspotentiale und daraus resultierende Emissionseffekte identifiziert worden und diese wurden in einer Simulation modelliert. Zur Erfüllung der Transportaufgaben wurden verschiedene Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung der Aspekte Mengentauglichkeit, Energiebedarf, Stabilität, Skalierbarkeit und Schwarmeignung untersucht. Es folgte in enger Abstimmung mit dem Partner SVA die Entwicklung verschiedener Formentwürfe und Laderaumkonzepte.

Auf Grundlage der Güterarten und Gütermengen wurden verschiedene Transportkonzepte erstellt und die Rahmenbedingungen für den Umschlag von verschiedenen Gütern z. B. in Klein-Containern oder standardisierten Abfallbehältern untersucht.

Die Simulationsumgebung für die Routen beinhaltet eine Energieverbrauchsabschätzung, um die Routen unter diesem Gesichtspunkt zu optimieren. Es wurden verschiedene Energieträger in Anlehnung an die Kraftstoffstrategie der Bundesregierung untersucht.

Die Simulationsumgebung wurde mit realen Transportdaten aus der Paketlogistik erprobt und logistisch sinnvolle Umschlagspunkte identifiziert. Technische Umschlagsmöglichkeiten und -konzepte wurden analysiert und ihre Tauglichkeit für verschiedene Umschlagplätze und Transportkonzepte untersucht. Die Betrachtungen wurden um Transporte im Bereich Entsorgung ergänzt.

3. ÜBERSICHT ÜBER DAS SCHIFFSSYSTEM

Die Grundidee des Schiffskonzeptes basiert auf dem Schubschiffkonzept, allerdings mit der Maßgabe, eine größere Anzahl kleinerer Fahrzeuge zu einem Schwarm zusammenzufassen. Eine herkömmliche Schiffsform wurde so unterteilt, dass sowohl in gekoppeltem Zustand als auch beim Betrieb der Einzelfahrzeuge losgelöst voneinander gute hydrodynamische Eigenschaften vorliegen. Es wurde eine Quersegmentierung vorgenommen und die zu autonomer Operation befähigten Einzelfahrzeuge des Laderaumbereichs mit einer Bug- und einer Hecksektion ergänzt, um bei gekoppeltem Betrieb von dem besseren Gesamtgütegrad zu profitieren. Als erster Schritt für ein derartiges System wurden zwei Einzelfahrzeuge als Demonstratoren in einem geringfügig verkleinerten Maßstab mit einer Länge von 6 m und einer Breite von 2,5 m gebaut.

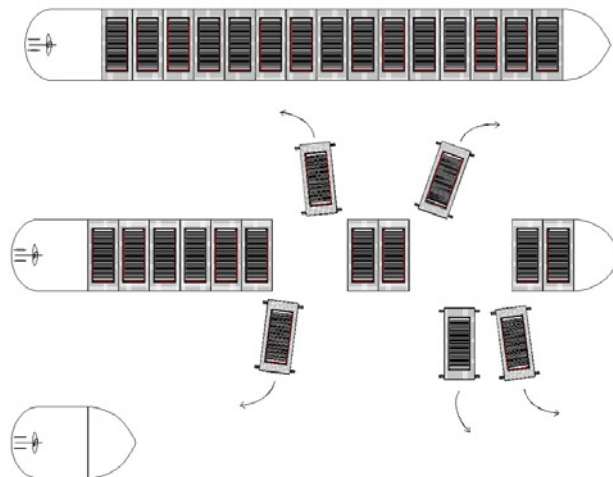


Abb. 1: Systemidee A-SWARM

Während das Fahrzeug in gekoppeltem Zustand wie ein normales Schiff betrieben wird, d.h. die Hecksektion beinhaltet die Hauptantriebe und übernimmt die Propulsion für die lange Strecke, so bewegen sich die einzelnen Teile des Schwarms beim Ansteuern der Enddestination nach Auflösung des Verbandes im 90°-Winkel zur ursprünglichen Schiffsachse. Die Kimmrundung des Koppelverbandes wird zu Bug- und Heck des Einzelfahrzeugs.

Bug- und Heckeinheit werden im Rahmen des Vorhabens DigitalSOW, Förderkennzeichen 45DTWV002F, passend zu den A-SWARM Demonstratoren gebaut.

Die SVA hat CFD-Berechnungen zum Leistungsbedarf der Einzelfahrzeuge und Untersuchungen zur Gestaltung der Trennfugen durchgeführt, um einen guten Kompromiss zwischen Längs- und Querfahrt zu finden.

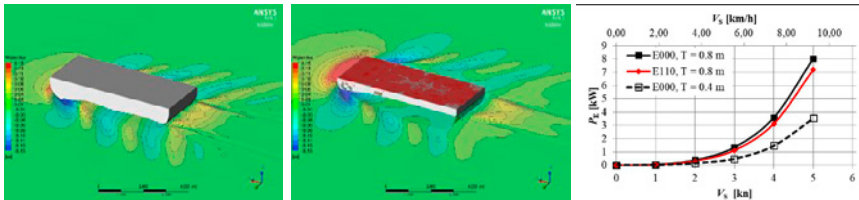


Abb. 2: $T = 0,4$ m $5,76$ m³ Bild 3: $T = 0,8$ m $11,27$ m³ Bild 4: Leistungsbedarf

4. SENSORSYSTEME

Die Sensorsysteme an Bord der Demonstratoren wurden in die Bereiche Nahfeld- und Fernfeldsensorik aufgeteilt. Im Bereich der Fernfeldsensorik kommen satellitengestützte Systeme (GNSS) im RTK-Mode (Real Time Kinematic) zum Einsatz. Die Fahrzeuge sind an den 4 Ecken mit entsprechend neu entwickelten Sensoren versehen worden, die eine Positionsermittlung in Echtzeit mit einer Genauigkeit von ± 10 mm ermöglichen. Gemessen werden alle drei Koordinaten, so dass über GNSS auch Trimm und Krängung ermittelt werden. Zusätzlich befindet sich ein Trägheitsnavigationssystem an Bord (IMU, Inertial Measurement Unit), welches jedoch nur der Überprüfung im Versuchsbetrieb dient, nicht der Steuerung und Regelung.

Die Daten der Fernfeldsensoren werden fusioniert und an das Regelungssystem über das bordeigene Netzwerk weitergegeben.

Als Nahfeldsensoren kommt zum einen Radartechnik und zum anderen LIDAR zum Einsatz. An jeder Ecke der Demonstratoren sind sog. Edgesensoren installiert, die mit je zwei 60GHz und je zwei 24GHz-Sensoren auf Halbleiterbasis (Infineon) bestückt wurden. Zusätzlich, aber nicht für die Navigation verwendet, sind Videokameras implementiert. Letztere dienen der Erlernung der mit den Radarsensoren erkannten Objekte mittels der im Vorhaben entwickelten und adaptierten KI.

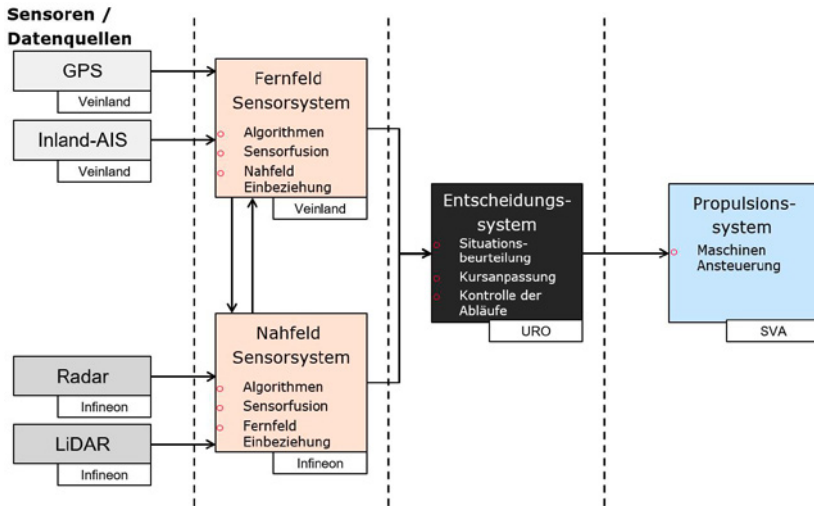


Abb. 5: A-SWARM Sensorsystem

Der Demonstrator DEMO 1 wurde darüber hinaus mit verschiedenen LIDAR-Sensoren ausgestattet. Zum einen kamen zwei handelsübliche 360°-Sensoren zur Anwendung, es wurden aber auch neu in der Entwicklung befindliche LIDAR-Sensoren von Infineon auf MEMS-Basis in der Mittschiffsebene verbaut. Letztere weisen keine beweglichen Bauteile auf und haben einen gegenüber den 360°-Lidarsensoren geringeren Winkelbereich und eine geringere Reichweite, stellen aber eine Neuentwicklung dar, deren Einsatzmöglichkeit es zu prüfen galt.

Infineon entwickelte in Absprache mit dem Systempartner eine Sensorplattform, basierend auf bestehenden 24 GHz Radarsensoren. Die Sensoren sollen sich relativ zum Schiff bewegende Objekte erkennen und klassifizieren können.

Hierzu gehörte die Entwicklung und Produktion von PCB Antennen, die Integration eines geeigneten Signalprozessors, die dazwischenliegenden Analog- und Mixed Signal Komponenten, wie ADCs, Verstärker und Filter sowie Firmware, die die Radarsensoren betreibt und die Sensordaten weiterverarbeitet.

Um die Reichweite des MEMS-LiDAR Sensors zu erhöhen bei gleichzeitiger Erweiterung des Gesichtsfelds ohne Einbußen bei der Auflösung sollte die Empfindlichkeit des LiDAR Empfängers deutlich verbessert werden. Dazu sollte eine neue Detektortechnologie untersucht werden, die auf so genannten Single Photon Avalanche Diodes (SPADs) beruht. Hier konnten deutliche Fortschritte erzielt werden.

Wie bei selbstfahrenden Autos ist es von Vorteil, die Radar- und LiDAR-Daten zu fusionieren, um ein komplettes Bild der Umgebung zu erhalten und weiterführende Berechnungen durchführen zu können. Diese Fusionierung kann jedoch nicht mit Rohdaten der

Sensoren gemacht werden. Es bedarf der Datenvorverarbeitung und einer vorangestellten Objektklassifizierung für eine effiziente Fusion der Daten. Damit ergibt sich für Nahfeldererkennungssystem, dass die Sensoren, Datenvorverarbeitung, Objektklassifikation, Sensorfusion und weiterführende Berechnungen die zentralen Komponenten des Systems ausmachen.

Das Nahfeldererkennungssystem von Infineon wurde parallel durch ein LIDAR-System der URO ergänzt, welches eine Vorausberechnung der Bewegung anderer Objekte und eine Bewertung einer möglichen Kollisionsgefahr der Objekte beinhaltet.

Grundlage für das Navigieren bilden die bestehenden Rahmenbedingungen des Fahrweges (Gewässertopologie, Umweltfaktoren etc.). Es war zu prüfen, wie weit die ENC-Karten hinreichend genau sind, um die Positionierungsaufgaben zu erfüllen. Es stellte sich heraus, dass die Genauigkeit der ENC-Karten in aller Regel für ein Navigieren mittels Bahnverfolgungssystem ausreicht. Autonome Systeme sollen jedoch auch bei Situationen, die kritisch sind, reagieren können und benötigen dafür beispielsweise Spielräume außerhalb des üblichen Tracks, in denen sich das Fahrzeug ohne Schaden zu nehmen bewegen kann. Hierfür sind die Informationen der ENC-Daten nicht hinreichend genau, insbesondere in Bezug auf die Bathymetrie außerhalb des betonnten Fahrwassers und in Hinblick auf andere Fahrzeuge.

5. ANTRIEBS- UND STEUERUNGSSYSTEM

Die Einzelfahrzeuge werden durch je 2 RIM-Drives angetrieben. Die handelsüblichen RIM-Drives haben einen Propellerdurchmesser von 133 mm und eine Leistungsaufnahme von max. 5 kW elektrisch. Die Antriebe sind um +/- 270° um die Hochachse schwenkbar. Das Schwenken wird über Schneckengetriebe mit einer Untersetzung von $i = 1:80$ und Servomotoren realisiert. Die Propeller weisen symmetrische Profile auf, um in beide Schubrichtungen identische Kraftwirkungen zu erzielen. Die hydrodynamische Auslegung der Propeller erfolgte durch die SVA. Die Synchronmotoren werden durch Sinus-Leistungsteller betrieben, die ihrerseits über einen CAN-BUS angesteuert werden.

Die Energie für die Antriebssysteme wird bei den Demonstratoren durch herkömmliche Blei-Gel-Batterien bereitgestellt. Für eine spätere Seriennutzung kann auf LiFePos umgestellt werden. Die Spannung der Fahrmotoren beträgt 48 V DC, was einen problemlosen Versuchsbetrieb ohne besondere Schutzmaßnahmen erlaubt. Die Bordnetzspannung liegt bei 24 V DC.

Eine Brennstoffzelle dient je nach Einstellung entweder der Pufferung des 24 V Bordnetzes oder des 48 V Antriebsnetzes und die Solarzellen laden das Bordnetz nach.



Abb. 6: schwenkbarer RIM-DRIVE

6. REGELUNGSSYSTEM

Der Lehrstuhl Regelungstechnik der Universität Rostock fokussierte sich im Teilvorhaben A-SWARM Control auf die Entwicklung und Umsetzung eines Regelsystems für die Anforderungen der Binnenschifffahrt auf eng begrenzten und stark befahrenen Gewässern. Ein weiteres Teilziel war die Echtzeit-Trajektorienoptimierung auf Grundlage elektronischer Seekarten und unter Berücksichtigung lokal erkannter, beweglicher und feststehender Hindernisse sowie anderer Wasserfahrzeuge. Im Folgenden sind die Schwerpunkte der beiden Ziele im Detail dargestellt:

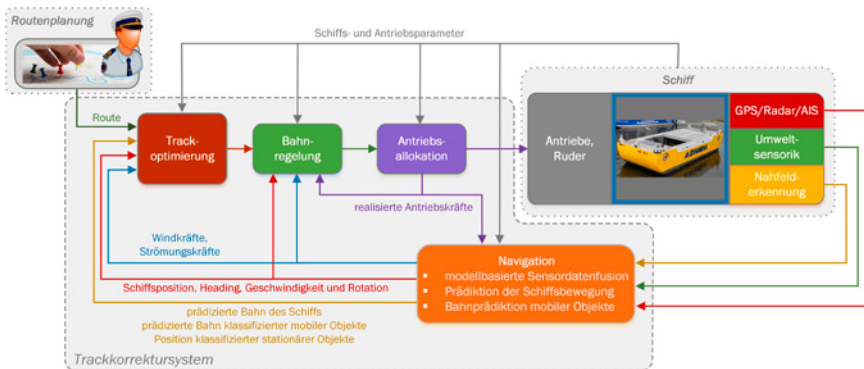


Abb. 7: Regelungssystem

7. BAHNFOLGEREGLUNG

Die Bahnregelung von Schiffen auf Binnengewässern ist von diversen speziellen Anforderungen geprägt. Neben den begrenzten Platzverhältnissen zum Manövrieren sind Binnengewässer oft durch örtlich begrenzte Strömungsverhältnisse charakterisiert und in städtischen Regionen kommen böige Winde, Düseneffekte und Windabschattungen hinzu. Diese haben einen signifikanten Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Schiffes und stellen hohe Anforderungen an die Regelung. Weiterhin beeinflussen hydrodynamische, durch geringe Gewässertiefen verursachte Effekte das dynamische Verhalten des Schiffes, was gegebenenfalls in den Regelungsalgorithmen berücksichtigt werden muss.

Schwerpunkt dieses Teilziels war die Erforschung von generischen Methoden zur Filterung und Vorsteuerung der auf das Schiff wirkenden wind- und strömungsinduzierte Störgrößen sowie deren frühzeitige Kompensation. Dies reduziert deren Einfluss auf den Versatz des Schiffes erheblich und ermöglicht das sichere Manövrieren an Engstellen, Schleuseneinfahrten und bei hohem Verkehrsaufkommen. Im Detail wurden folgende Aspekte verfolgt und umgesetzt:

- › Entwicklung von regelungstechnischen Modellstrukturen inklusive der Abbildung von binnengewässertypischen Störungen zur Nutzung im automatischen Entwurf der Regelungsparameter sowie in Echtzeitsimulationen innerhalb HiL-Tests des Gesamtsystems.
- › Entwicklung geeigneter Filter zur Berücksichtigung der Sensordaten (Strömung, Wind) bei der Positions- und Bewegungsbestimmung des Schiffes
- › Untersuchungen zur Eignung von robusten und adaptiven Methoden zur Parametrierung des Reglers
- › Entwicklung von Ansätzen und Entscheidungskriterien zur situationsabhängigen Umschaltung der Allokationsalgorithmen zwischen energieoptimaler Kraftherzeugung und erweiterten Anforderungen im Rahmen von Präzisionsmanövern

8. ECHTZEIT-TRAJEKTORIENOPTIMIERUNG MIT LOKALER KOLLISIONS-ERKENNUNG

Fahrwege von Binnenschiffen sind in der Regel durch örtliche Gegebenheiten, die betonnte Fahrrinne und weiteren Seezeichen weitgehend vorgegeben bzw. fest geplant. Im realen Schiffsbetrieb sind jedoch aus verschiedenen Gründen Abweichungen von dieser Route notwendig. Typische Szenarien sind hier Ausweichvorgänge bei Schiffsbegegnungen bzw. bei festen oder mobilen Hindernissen im Fahrweg, wetterbedingte Abweichungen durch Wind und Strömung oder auch Nothaltemanöver in Gefahrensituationen.

Sind Abweichungen von der geplanten Route notwendig oder schon aufgetreten, muss eine neue Fahrtroute erstellt werden, die gewissen Anforderungen genügen soll. Diese wären:

- › Die neue Route muss sicher und ohne weitere Hindernisse befahrbar sein. Dabei sollten neben den Seekartendaten auch Fahrwege anderer Wasserfahrzeuge und mobile Hindernisse dem Zeithorizont der Planung entsprechend Berücksichtigung finden.
- › Die neue Route soll möglichst energieeffizient sein, das heißt der Energiebedarf für die geplante Route sollte als Optimierungskriterium Eingang in die Trajektorienplanung finden.
- › Die neu geplante Strecke soll in möglichst kurzer Zeit durchfahren werden können.

Die genannten Kriterien beeinflussen sich untereinander. Aufgabe der Trajektorienplanung ist es somit auch eine geeignete Wichtung der Kriterien zu finden. Ob diese Wichtung fest vorgegeben wird oder auf Grund der aktuellen Datenlage berechnet werden kann, war Gegenstand der Forschungsarbeit in diesem Teilprojekt.

Resultierend aus den genannten Anforderungen und Vorgaben wurden folgende Teilziele im Projekt umgesetzt:

- › Entwurf einer Bewegungsprädiktion zur Bestimmung des voraussichtlichen Fahrwegs in einem bestimmten Zeithorizont.
- › Konzeption und Realisierung geeigneter Kollisionserkennungsalgorithmen für feststehende und mobile Hindernisse sowie anderer Wasserfahrzeuge.
- › Entwicklung und Umsetzung eines Optimierungsalgorithmus zur energie- und zeitoptimalen Planung einer Trajektorie für einen vorgegebenen Zeithorizont oder zur Erreichung eines vorgegebenen Zielpunkts unter vorgegebenen Randbedingungen

9. SIMULATIVE UND EXPERIMENTELLE ÜBERPRÜFUNG DER KONZEPTE UND ALGORITHMEN

Neben der Konzeption und Realisierung der Regelungsalgorithmen und Trajektorienoptimierung war ein wesentliches Projektziel die simulative und vor allem reale und wirklichkeitsnahe Validierung der Umsetzung mit den im Projekt gebauten Versuchsträgern. Im Detail wurden folgende Arbeitsziele realisiert:

An einer eigens geschaffenen Simulationsumgebung erfolgte die simulative Überprüfung des Regelungssystems und der Trajektorienoptimierung. Dies beinhaltet die Überprüfung und Bewertung der geschaffenen Systeme unter definierten und reproduzierbaren Anwendungs- und Störszenarien.

Eine erste experimentelle Überprüfung erfolgte an einem der Demonstratoren im Schleppkanal der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam. Insbesondere wurde hier das Regelsystem mit der Bahnregelung parametrisiert und erprobt.

In mehreren Erprobungskampagnen erfolgte die experimentelle Überprüfung an Versuchsträgern im Berliner Westhafen unter realen Witterungs- und Strömungsbedingungen. Hier wurden neben der im Projekt entwickelten Sensorik zur Nahfeldererkennung auch die Allokationsalgorithmen und Schnittstellen zu den Antrieben getestet. Zur wirklichkeitsnahen Erprobung der Kollisionserkennungs- und Ausweichalgorithmen diente das Arbeitsboot der Universität Rostock. Mit diesem konnten reale Begegnungssituationen, wie Gegenverkehr, Überholmanöver und Querverkehr reproduzierbar nachgestellt werden.

10. GERÄTECHNISCHE INTEGRATION

Die gesamte Elektrotechnik wurde auf einer Montageplatte mit Datenverteilern, den unterschiedlichen Versorgungsspannungen, Netzwerkschaltern u.v.m. installiert. Die entwickelten und eingesetzten Baugruppen wurden alle nach IEC 60945 gebaut und geprüft. Im Hinblick auf eine spätere Systemzulassung wurden alle Sensoren und Datenlieferanten nach den gültigen DIN-, IEC- und VDE-Normen projektiert und eingebunden. Auch wurden für beide Versuchsträger eine MMSI Nummer bei den öffentlichen Stellen beantragt und eingeführt.

Um die erforderliche sehr genaue Positionserfassung der Versuchsträger zu realisieren und diese dann den anderen Teilnehmern als Multicast mit hoher Datenrate zur Verfügung zu stellen, wurde der unter dem Kapitel Sensoren genannte Ansatz gewählt, indem an allen vier Ecken des Versuchsträgers jeweils eine DGPS Positionserfassungseinheit entwickelt und installiert wurde. Dadurch kann nicht nur hochgenau die Position erfasst werden, sondern auch die Lage des Fahrzeuges. Dieser Positionserfassungsansatz ist für Fahrzeuge dieser Art neu, weil dadurch weitere sonst benötigte System wie Tiefgangbestimmung, Roll, Trimm, Heel, ROT Indikatoren nicht noch zusätzlich verbaut werden müssen. Insofern erreicht man hier eine deutlich verbesserte Genauigkeit der Positionsbestimmung, Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeit und eine sinnvollere Energiebilanz. Bei der Auswertung im L1 und unter Einbeziehung des Korrektursignals mittels Sapo Dienst über LTE konnte eine Genauigkeit von 1 cm in allen drei Freiheitsgraden erreicht werden.

Veinland entwickelte die Gehäuse für die Edge-Sensoren inklusive der automatisch je nach Bewegungsrichtung des Fahrzeuges sich umschaltenden Positionslaternen nebst Warnlampen. Zur Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit durchs Wasser in X- und Y-Richtung ist ein Doppler-Log vorgesehen worden.

11. SICHERHEITASPEKTE AUTONOMER FAHRZEUGE

Bei der Entwicklung autonomer Wasserfahrzeuge ist besonderes Augenmerk auf die Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu legen. Besonders bei Forschungsfahrzeugen ohne Personen an Bord ist deshalb eine sichere, alternative und prioritäre Steuerungsmöglichkeit zu den bordseitigen Navigations- und Steuerungssystemen unumgänglich. Die Demonstratoren verfügen über eine ständige Funkverbindung zwischen einer Landstation und den Fahrzeugen. Diese erfolgt entweder über WLAN oder über eine ge-

sicherte Verbindung über LTE (VPN-Tunnel). Damit ist dem Überwachungspersonal der Landstation jederzeit die Möglichkeit gegeben, die Bahnverfolgung zu unterbrechen und manuell zu übernehmen. Das Fahrzeug kann dann mittels Joystick gesteuert werden oder per Knopfdruck in den DP-Modus gebracht und so aktiv auf der Stelle festgehalten werden. Sollte die Funkverbindung abreißen, stoppen die Antriebe und es kann sofort mittels einer separaten kommerziellen Funkfernsteuerung (Performance Level d nach ISO 13849) übernommen werden. Diese arbeitet direkt auf die Antriebe und nutzt nicht den Bordrechner der Fahrzeuge, so dass auch Programmfehler oder -abstürze nicht zu einem Versagen dieser Fernsteuerungsmöglichkeit führen können. Die Funkfernsteuerung ist prioritär, d.h. sie hat immer Vorrang vor der Automatik und dem Navigationsrechner, damit ist eine sofortige Reaktionsmöglichkeit gewährleistet. Die Reichweite der Funkfernsteuerung beträgt 200 m – 300 m. Die Demonstratoren werden immer von einem Begleitboot verfolgt, so dass diese Entfernung niemals überschritten wird und jederzeit eine Eingriffsmöglichkeit besteht. Als letzte Sicherheitsoption verfügen die Demonstratoren über Notausschalter an den 4 Fahrzeugecken. Die Betätigung führt zu einem sofortigen Stoppen der Antriebe und der Demonstrator könnte mit dem Begleitboot auf Seite genommen oder geschleppt werden.

12. WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

Eine besondere Herausforderung stellen die rechtlichen Randbedingungen autonomer Schiffe dar:

Die Binnenschiffahrtsstraßenordnung (BinSchStrO) besagt in ihrem § 1.02:

„Der Schiffsführer muss während der Fahrt an Bord sein“

Ohne eine Änderung dieses Paragraphen ist keine autonome (Binnen-) Schifffahrt möglich. Darüber hinaus stellen sich weitere Fragen:

Wer hat die Verantwortung für ein autonom operierendes Fahrzeug inne? Ist es der Reeder, der Softwareentwickler, der Hardwarelieferant, der Fernsteuerer, so denn einer vorhanden ist?

- › Wer haftet im Falle einer Havarie (zivil- und strafrechtlich)?
- › Wem gehören die Daten, die ein autonomes Fahrzeug generiert?
- › Wie ist mit der Verpflichtung zur Hilfeleistung (§ 323c StGB, § 1.16 BinSchStrO) umzugehen:

1. Der Schiffsführer muss bei einem Unfall, der die Besatzung oder Fahrgäste gefährdet, zu ihrer Rettung alle verfügbaren Mittel aufbieten.

2. Sind bei dem Unfall eines Fahrzeugs oder Schwimmkörpers Menschen in Gefahr oder droht infolge des Unfalls eine Sperrung des Fahrwassers oder einer Schleuse

nach § 6.28 Nummer 1, ist der Schiffsführer jedes in der Nähe befindlichen Fahrzeugs verpflichtet, unverzüglich Hilfe zu leisten, soweit dies mit der Sicherheit seines eigenen Fahrzeugs vereinbar ist.

Autonome Fahrzeugsysteme haben nicht nur technische Hürden zu überspringen, sondern auch bürokratische. Hier ist eine enge Abstimmung zwischen der Forschung und der Gesetzgebung erforderlich.

Es wäre vermessen zu behaupten, dass mit dem Vorhaben A-SWARM ein autonomes Fahren von Wasserfahrzeugen realisiert worden wäre, jedoch ist ein wichtiger Schritt in diese Richtung erfolgreich absolviert worden. Es bleibt noch erhebliche Arbeit in den Bereichen Objekterkennung und -klassifizierung sowie bei der Detektion der klassischen Schifffahrtszeichen und Schallsignale. Darüber hinaus sind die Systemidentifikationen für verschiedene Beladungszustände und Fahrzeugzusammenstellungen zu untersuchen und zu vereinfachen, z. B. durch minimale Manöver im normalen Fahrbetrieb. Die derzeit noch notwendige komplette Kontrolle der Fahrzeuge von einer Landstation aus erfordert eine WLAN-Verbindung zum Testobjekt. Hier muss eine Datenreduktion durch Verlagerung von Entscheidungen auf das autonome Fahrzeug erfolgen, da die Versuche z. B. unter Nutzung des LTE-VPN-Netzes gezeigt haben, dass die dort möglichen Datenraten und Latenzen inakzeptabel sind. Bei hinreichender Intelligenz auf dem Fahrzeug mag zukünftig ein einfaches Mobilfunknetz für Überwachungszwecke ausreichen, für eine vollfunktionsfähige Kontrolle und Datentransfer ist eine 5G-Umgebung erforderlich.

Potsdam, den 14.09.2022

Für das Team A-SWARM

Dr. Christian Masilge

DANKSAGUNG

Das Konsortium A-SWARM bedankt sich beim Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz für die Bereitstellung von Fördermitteln für die Realisierung des Forschungsvorhabens und beim Projektträger Jülich für die professionelle administrative Betreuung.

OSCAR –

ONLINE MODELING, SIMULATION AND REMOTE CONTROL SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES ON-BOARD (CRUISE) SHIPS

AUTOREN

MALTE ZERETZKE	CARNIVAL MARITIME, CMG
TOBIAS KAULFUSS	CARNIVAL MARITIME, CMG
PROF. DR.-ING. STEPHAN KÖSTER	LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER, LUH
DAGMAR POHL	LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER, LUH
THORSTEN ARENDT	SEGNO

EINLEITUNG

Die Verschärfung umwelttechnischer Anforderungen erfordert den Einsatz zusätzlicher Technologien sowie eine bessere Ausnutzung der Leistungsfähigkeit vorhandener Anlagen an Bord von (Kreuzfahrt-)schiffen. Der Betrieb der vielfältigen und zunehmend komplexen umwelttechnischen Prozesse stellt hohe Anforderungen an das Betriebspersonal. Ziel des Forschungs- und Entwicklungsprojektes OSCAR ist es, ein cloudgestütztes Remote-Prozessleitsystem (PLS) für umwelttechnische Prozesse zu entwickeln und, insbesondere unterstützt durch digitale Zwillinge, einen zuverlässigen und effizienten Anlagenbetrieb zu fördern sowie das Betriebspersonal an Bord zu unterstützen. Der Projektfokus liegt dabei auf der Behandlung von Abwasser und organischen Reststoffen.

Konkret werden in OSCAR auf der Grundlage einer sensorbasierten Datenerfassung, Prozessmodellierung sowie darauf aufbauender Betriebszustandsprognosen bedarfsgerechte Eingriffe in den Betrieb sowie optimale Betriebsstrategien ermöglicht. Zusätzlich wird ein landseitiges zentrales Flottenmanagement mittels Anlagenfernüberwachung und -steuerung umgesetzt. Schwerpunkte der F&E-Arbeiten sind:

- › Erfassung der Ist-Situation an Bord hinsichtlich relevanter Stoffströme, Prozesse und Betriebsabläufe (CMG und LUH),
- › Erarbeitung und Umsetzung eines Datenerfassungs- und Messkonzeptes für das Anlagenmonitoring (CMG und LUH),
- › Entwicklung und Erprobung von Beobachter- und Prognosemodellen (Digitale Zwillinge) der relevanten Anlagen und Prozesse (LUH),
- › Implementierung einer Cloud-Lösung zur Anlagenfernüberwachung und -steuerung von Land aus (SEGNO).

2. AUSGANGSSITUATION – ABWASSER- UND ORGANISCHE RESTSTOFF-BEHANDLUNG AN BORD

Um Ansatzpunkte und Randbedingungen für die Betriebsunterstützung und -optimierung zu identifizieren, wurden zunächst die aktuelle Betriebssituation analysiert und Mengen, Zusammensetzung und Dynamik des Reststoff- und Abwasseranfalls charakterisiert. Dazu wurden neben Betriebsdaten auch Daten und Erkenntnisse aus den zuvor implementierten F&E-Projekten CLEAN (BMW FKZ 03SX437C) und NAUTEK (BMW FKZ 03SX360A) sowie aus der Literatur herangezogen, um ein möglichst vollständiges Bild zu generieren.

Abb. 1 zeigt eine vereinfachte Übersicht der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung an Bord.

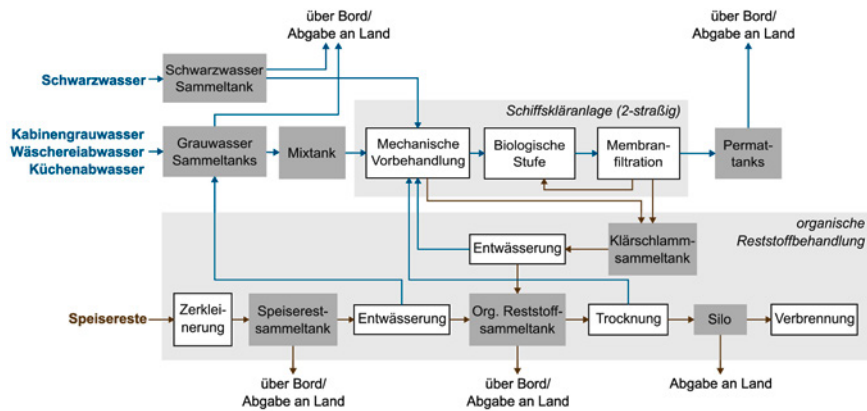


Abb. 1: Vereinfachte Übersicht der Abwasser- und organischen Reststoffbehandlung auf einem modernen Kreuzfahrtschiff

Die Entsorgung der Abwässer erfolgt in der Regel nach Behandlung in der Schiffskläranlage. Nach IMO MEPC.227(64) inkl. Anhang 4.2 zertifizierte Anlagen können Ablaufwerte erreichen, die mit denen landseitiger Kläranlagen vergleichbar sind, sodass –bei sachgerechtem Betrieb– die direkten Schmutz- und Nährstoffemissionen nicht höher sind als bei Abgabe der Abwässer im Hafen mit nachfolgender Aufbereitung durch landseitige Kläranlagen. Bei den organischen Reststoffen ist die landseitige Abgabe der Entsorgung im Meer aus umweltschutztechnischer Sicht grundsätzlich vorzuziehen. Um das für die Zwischenspeicherung benötigte Volumen zu reduzieren, können die organischen Reststoffe entwässert und getrocknet werden. Viele Schiffe verfügen zudem über Systeme zur Verbrennung getrockneter Reststoffe.

Während die Entwässerung und Trocknung stundenweise und in unregelmäßigen Abständen betrieben werden können, ist für die Stabilität der biologischen Prozesse in der Schiffskläranlage ein weitgehend durchgängiger Betrieb mit möglichst konstanter Beschickung erforderlich. Schwankungen der Zulaufmenge und -zusammensetzung erfordern (z.T. manuelle) Anpassungen der Betriebsparameter der Kläranlage, um eine

konstant gute Ablaufqualität zu erreichen. Die bei der Entwässerung und Trocknung anfallenden hochkonzentrierten Abwässer können zu hohen Belastungsspitzen in der Schiffskläranlage führen. Entsprechend ist ein auf die vorherrschenden Randbedingungen (Abgabemöglichkeiten, verfügbares Speichervolumen, Belastung der Kläranlage) abgestimmter Betrieb nötig, um die Reststoffabgabe ins Meer zu minimieren und gleichzeitig einen stabilen Kläranlagenbetrieb sicherzustellen. Einen weiteren Ansatzpunkt zur angepassten Beschickung bieten die Sammel tanks, in denen die anfallenden Abwasserströme weitgehend voneinander getrennt vor der Behandlung zwischengespeichert werden (Speicherkapazität von wenigen Stunden bis mehreren Tagen, je nach Stoffstrom und Schiffstyp).

Insgesamt wurden folgende wesentliche Ansatzpunkte für die Betriebsunterstützung und -optimierung identifiziert:

- › die Ausnutzung vorhandener Speicherkapazitäten zur Nutzung möglichst umweltschonender Entsorgungswege sowie zur optimierten Beschickung der Schiffskläranlage,
- › die Optimierung des Schiffskläranlagenbetriebs hinsichtlich Ablaufwerten, Prozessstabilität, Personalaufwand, Energiebedarf usw.

Für die Entwicklung des OSCAR-PLS wurde daraus Folgendes abgeleitet:

- › Neben den Behandlungsprozessen werden die Speichertanks mitbetrachtet. Dies erlaubt zum einen, die Speichertankbewirtschaftung in die Betriebsunterstützung und -optimierung einzubeziehen. Zum anderen kann die Zusammensetzung des Kläranlagenzulaufs aus den Betriebsdaten der Speichertanks berechnet werden.
- › Um eine möglichst gute Ausnutzung der Speicherkapazitäten sowie den vorausschauenden Betrieb der Kläranlage zu ermöglichen, wird der Anfall der einzelnen Abwasserteilströme sowie der organischen Reststoffe über den Tagesverlauf prognostiziert.
- › Da die biologische Stufe ein für die Reinigungsleistung der Schiffskläranlage ausschlaggebender aber auch störanfälliger Prozessschritt ist, wird hierauf ein besonderer Fokus gelegt. Neben einem Messkonzept zur Zustandsüberwachung wird dafür ein detailliertes Simulationsmodell erstellt, welches das Prozessmonitoring und die Betriebsoptimierung unterstützt.

3. DATENERFASSUNG UND MESSTECHNIK

Die Messung von Prozessparametern sowie die Erfassung weiterer relevanter Anlagendaten bildet die Grundlage für die Betriebsüberwachung und -optimierung. Daher wurde eruiert, welche Betriebsdaten und Prozessparameter bereits zur Verfügung stehen und welche Daten darüber hinaus benötigt werden. Weitere Sensoren sollten einfach verfügbar, relativ wartungsarm und einfach einzubauen sein. Zur Erprobung des Messkonzeptes wurde die entsprechende zusätzliche Sensortechnik auf einem Schiff nachgerüstet.

Für die Speichertankbewirtschaftung ist im Wesentlichen die Kenntnis der aktuellen Tankfüllstände nötig. Diese werden in der Regel ohnehin gemessen, da sie sicherheitsrelevant für den Schiffsbetrieb sind (Stabilität). Für den Fall einer Nachrüstung ist entsprechende Messtechnik standardmäßig in verschiedenen Ausführungen am Markt verfügbar. Neuinstallationen bedürfen ggf. der Installation während eines Trockendocks.

In der Schiffskläranlage wurden bisher lediglich die Parameter Schlammrockensubstanz (TS), Sauerstoffgehalt im Bioreaktor (O_2) und Trübung im Ablauf nach Membranfiltration (Permeat) online gemessen, sowie die Permeatmengen (Q) hydraulisch erfasst, jedoch nicht dokumentiert oder für den Anlagenbetrieb weiter genutzt. Diese Parameter sind zudem nicht ausreichend, um die Ablaufqualität direkt zu beurteilen und die Prozessführung zielgerichtet anzupassen. Daher wurde ein Messkonzept entwickelt, das erlaubt, die Leistung der biologischen Abwasserreinigungsprozesse und die dafür relevanten Prozessparameter zu erfassen. Das erarbeitete Messkonzept ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

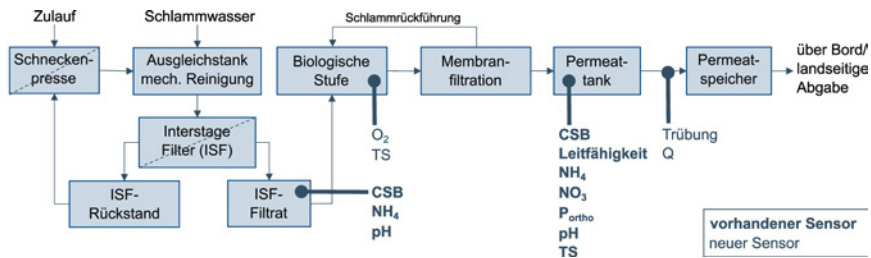


Abb. 2: Schematische Darstellung der Online-Sensoren zur Überwachung der biologischen Prozesse in der Schiffskläranlage

Zur Überwachung der Ablaufwerte (Chemischer Sauerstoffbedarf CSB, Stickstoff, Phosphor, TS) dient die Messstelle im Permeattank. Ammonium (NH_4) und Nitrat (NO_3) werden hier stellvertretend für den Gesamtstickstoff gemessen, da dieser nicht direkt online messbar ist und in der Regel kaum organischer Stickstoff im Ablauf vorliegt, was die im Projekt durchgeführten Laboranalysen bestätigen. Zudem lassen die NH_4 - und NO_3 -Konzentration Rückschlüsse auf die Nitrifikations- und Denitrifikationsleistung zu. Anhand der Phosphatmessung (P_{ortho}) im Permeat kann bei Bedarf Fällmittel dosiert werden. Ergänzend wird die Leitfähigkeit gemessen, da die Messung günstig und robust ist und ggf. zur Plausibilisierung der anderen Messwerte herangezogen werden kann. Die pH-Messung im Permeat dient der Sicherstellung eines für die Mikroorganismen geeigneten Milieus und liefert in Kombination mit der pH-Messung im Zulauf indirekten Aufschluss über den Stickstoffabbau. Mittels TS-Messung im Permeat wird die Membrantintegrität überwacht. Um die Belastung der Kläranlage und die Reinigungsleistung zu ermitteln erfolgen Messungen im Interstage-Filter-Filtrat (Zulauf zur biologischen Stufe). Auf die Messung der NO_3 -Konzentration kann an dieser Stelle verzichtet werden, da diese im Zulauf vernachlässigbar gering ist.

Abb. 3 zeigt Fotos der an Bord installierten Messtechnik. Da die standardmäßig verfügbare Messtechnik für Landkläranlagen angepasst ist, wo sich nahezu immer offene Tanks finden, sind Rohreinbausonden für geschlossene Systeme seltener verfügbar (z.B. für pH, TS). Für die Sensoren, die nicht standardmäßig für den Rohreinbau verfügbar waren, wurden in OSCAR spezielle Adapter entwickelt, die sich zwar als funktional, aber äußerst wartungsunfreundlich herausgestellt haben (u.a. wegen Eigengewicht in hängender Rohrleitung). Da es regelmäßig zu Leckagen kam, wurde später der Tankeinbau über Wartungsluken präferiert. Grundsätzlich ist bei der Wahl der Einbauvarianten unbedingt auf eine gute Zugänglichkeit für Wartungszwecke zu achten. Unter Umständen ist eine langfristige Planung und Durchführung im Trockendock erforderlich.



Abb. 3: An Bord installierte Messtechnik zur Überwachung der biologischen Prozesse in der Schiffskläranlage - links: Sondeneinbau in Rohrleitung mit in OSCAR entwickeltem Adapter, Mitte: OSCAR-Monitor direkt an der Anlage, rechts: Live-Messwertanzeige

Die Messabweichung lag bei einigen Sensoren bereits mit der werksseitigen Kalibrierung in einem akzeptablen Bereich von ca. 10 %, bei anderen war eine anwendungsspezifische Kalibrierung erforderlich. Insgesamt zeigte sich eine unerwartete Störungsanfälligkeit fast aller Sensoren. Für die Inbetriebnahme sollte daher ein ausreichend langer Zeitraum vorgesehen werden, in dem die Messwerte regelmäßig gegengeprüft und ggf. Anpassungen vorgenommen werden.

Neben der technischen Umsetzung ist die Akzeptanz durch die Crew entscheidend für den erzielten Nutzen. Dabei spielt einerseits die Bedien- und Wartungsfreundlichkeit eine Rolle (Zusatzaufwand). Andererseits ist eine gute Kommunikation erforderlich, damit das Monitoringsystem nicht als Überwachung, sondern als die intendierte Betriebsunterstützung wahrgenommen wird. Die bisherigen Erfahrungen sind in der Hinsicht sehr gut: die Anzeige der Live-Werte auf dem OSCAR-Monitor (siehe Abb. 3) wird durch die Besatzung positiv aufgenommen und es wird aktiv daran mitgearbeitet gute Werte zu erzielen.

4. DIGITALE ZWILLINGE DER ABWASSER- UND ORGANISCHEN RESTSTOFF-BEHANDLUNG

Aufbauend auf der Prozessbeobachtung anhand von Messwerten sowie zur Prognose zukünftiger Betriebszustände werden in OSCAR die im Folgenden beschriebenen Simulationsmodelle entwickelt:

- › ein Modell zur Prognose der anfallenden Stoffströme als Grundlage für den vorausschauenden Anlagenbetrieb,
- › ein Online-Simulationsmodell der biologischen Stufe der Schiffskläranlage zur Prozessüberwachung und Zustandsprognose.

4.1. PROGNOSE DER ANFALLENDEN STOFFSTRÖME

Anhand des Prognosemodells wird der Anfall von Abwasser und Speiseresten über den Tagesverlauf in Abhängigkeit der Betriebssituation (Anzahl Personen an Bord, Landgänge und Passagierwechsel, Betriebsabläufe Wäscherei usw.) abgeschätzt. Dafür wurde ein phänomenologischer Modellierungsansatz gewählt. Für den Anfall der Abwasserteilströme und Speisereste wurden wesentliche Einflussfaktoren identifiziert und die entsprechenden Zusammenhänge mathematisch beschrieben. Dazu wurden aufgezeichnete Tankfüllstände und weitere Betriebsdaten (bspw. Betriebsprotokolle der Wäscherei und Datenblätter der Waschmaschinen, Anzahl der zubereiteten Mahlzeiten usw.) herangezogen. Da für das Schwarzwasser nur Stichprobendaten und Tagesmengen von Bord verfügbar waren, erfolgte die Modellierung basierend auf umfangreichen Daten und Informationen aus der Literatur zum Anfall von Urin und Fäzes. Das Prognosemodell ist modular aufgebaut: die Stoffströme sowie die Passagieraktivitäten werden jeweils in Teilmodellen berechnet, die zu einem Gesamtmodell – auch mit weiteren Modellmodulen für die Speichertanks und Behandlungsprozesse – verknüpft werden können. Um die Vorhersage an die jeweils aktuellen Bedingungen anpassen zu können, dienen möglichst leicht verfügbare Daten aus dem Schiffsbetrieb als Eingangsdaten.

Der Anfall von Küchenabwasser, Wäschereiabwasser und Speiseresten wird anhand von Betriebsdaten berechnet. Dabei handelt es sich zum Teil um schiffsspezifische, aber grundsätzlich konstante Werte (bspw. m^3 Küchenabwasser pro zubereitete Gedecke, m^3 Wäschereiabwasser pro kg Wäsche). Andere Werte müssen der Betriebssituation entsprechend aktualisiert werden (bspw. Anzahl zubereitete Gedecke und Essenszeiten, kg Wäsche pro Tag und Betriebszeiten der Wäscherei). Für den praktischen Einsatz des Prognosemodells im Betrieb sollten entsprechende Schnittstellen und organisatorische Abläufe geschaffen werden, die bereits im System vorhandene Werte mit dem Prognosemodell verknüpfen bzw. die Eingabe der benötigten Daten durch das Personal ermöglichen.

Der Kabinengrau- und Schwarzwasseranfall hängt eng mit dem Passagierverhalten zusammen. Zeiten des Aufstehens, Zubettgehens und der Landgänge beeinflussen

Zeitpunkt, Art und Häufigkeit der Toiletten- und Badnutzung. Daher ist die Prognose des Kabinengrau- und Schwarzwasseranfalls an ein Modell der Passagieraktivitäten gekoppelt.

Bei der Berechnung der Schwarzwasserzusammensetzung werden die im Tagesverlauf variierenden Anteile an Fäzes und Urin berücksichtigt. Für die anderen Ströme wird eine konstante Zusammensetzung angesetzt, die sich an typischen Werten orientiert.

Die mit dem Prognosemodell berechneten Werte stimmen mit den vorliegenden Daten von Bord gut überein. Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit war bisher jedoch nur eine begrenzte Modellvalidierung möglich. Eine Anpassung und Verfeinerung des Modells anhand eines größeren Datensatzes wäre durch den modularen Aufbau und die Parametrierbarkeit leicht möglich.

4.2. ONLINE-SIMULATIONSMODELL DER BIOLOGISCHEN STUFE DER SCHIFFSKLÄRANLAGE

Mithilfe des Online-Simulationsmodells werden:

- › zusätzliche Daten bereitgestellt, die messtechnisch nicht erfasst werden (können),
- › durch den Abgleich mit Messwerten Probleme mit der Messtechnik sowie außergewöhnliche Betriebszustände einfacher erkannt,
- › das Prozessverständnis verbessert und eine vertiefte Prozessanalyse ermöglicht,
- › der weitere Prozessverlauf prognostiziert, um mögliche Betriebsprobleme frühzeitig erkennen und Auswirkungen geplanter Betriebseingriffe abschätzen zu können.

Die Modellentwicklung und -erprobung erfolgt anhand einer im Technikum der LUH betriebenen Versuchsschiffskläranlage sowie ergänzenden Laborversuchen. Der Anlagenbetrieb an Land erlaubt es, verschiedene Betriebszustände – weit über den an Bord verträglichen Rahmen hinaus – herbeizuführen. Für die Beschickung der Versuchsanlage wurde eine vollautomatisierte Abwassermisch- und -dosierstation gebaut, die Abwasser mit einem vorgegebenen Tagesverlauf der CSB- und Stickstoffkonzentrationen zur Nachbildung schiffstypischer Zuläufe bereitstellt. Dazu wird das kommunale Abwasser der Kläranlage Hannover-Herrenhausen mit bis zu drei verschiedenen Zusatzstoffen versetzt, wobei die zuzudosierenden Mengen anhand aktueller Online-Messwerte berechnet werden.

Zur Abbildung des aktuellen Anlagenzustandes wurde in der Software SIMBA# das in Abb. 4 dargestellte Simulationsmodell der Versuchsanlage erstellt, das in Echtzeit mitläuft (Aktualisierung der Eingangsdaten und Berechnung des neuen Zustandes alle 5 s). Daten aus dem PLS der Versuchsanlage werden über die Open Source-Plattform ifakFAST in das Modell eingespeist.

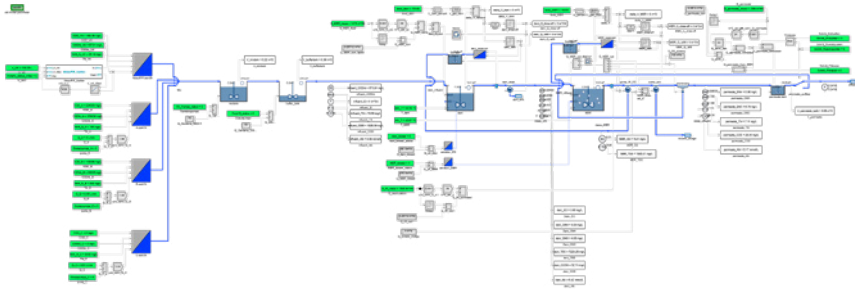


Abb. 4: Online-Simulationsmodell der Versuchsschiffskläranlage inkl. Abwassermisch- und -dosierstation. Die live aus dem PLS der Anlage eingespeisten Werte sind grün hinterlegt.

Erste Ergebnisse zeigen, dass wesentliche Trends der Konzentrationsänderungen relevanter Parameter bereits mit nur geringen Anpassungen der Modellparameter korrekt abgebildet werden und anhand der zusätzlichen durch das Modell bereitgestellten Daten leichter nachvollziehbar sind. Wesentliche Fragen für die weitere Entwicklung sind u. a. die Erzeugung geeigneter Ausgangszustände für den Start der Echtzeit-Simulation sowie das Vorgehen zur Nachführung (Anpassung bei Abweichungen vom tatsächlichen Anlagenzustand).

5. ANLAGENFERNÜBERWACHUNG UND -STEUERUNG

Ein weiterer Baustein des OSCAR-PLS ist das zentrale Flottenmanagement, das die Betriebsunterstützung und langfristige Weiterentwicklung und Verbesserung der Prozesse durch sachkundiges Personal von einer landseitigen Zentrale aus ermöglicht. Abb. 5 zeigt schematisch das in OSCAR entwickelte System.

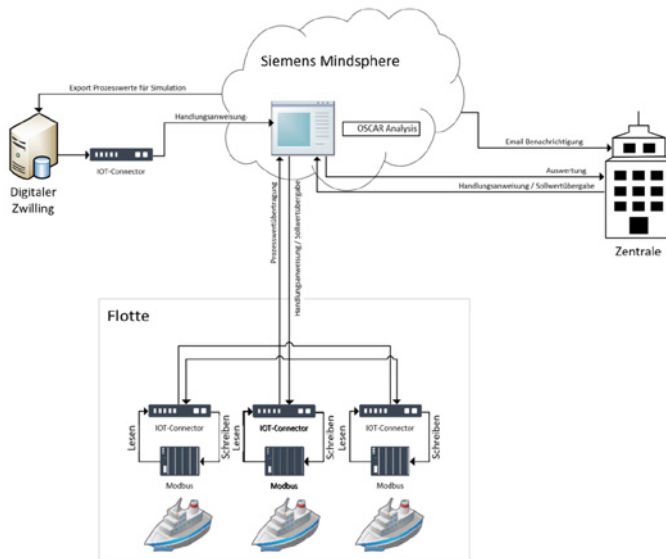


Abb. 5: Übersichtsschema der OSCAR-Cloud

Um Prozessdaten aus dem Steuerungsnetz der Anlagen an Bord auszulesen und an ein zentrales Cloudsystem zu übermitteln wurde der „IoT-Connector“ entwickelt, der in parametrierbaren Zeitintervallen alle konfigurierten Messwerte zyklisch aufzeichnet und gesammelt, nach einem ebenfalls parametrierbaren Zeitintervall, an ein gesichertes Cloudsystem sendet (hier: Siemens Mindsphere). Die Übertragung der Daten setzt eine Internetverbindung voraus, die an Bord ggf. nicht durchgehend zur Verfügung steht. Besteht keine Internetverbindung, stellt der IoT-Connector sicher, dass die bisher aufgetragenen Prozessdaten lokal auf dem Gerät gespeichert werden, bis die Verbindung wiederhergestellt ist. Alle bisher nicht gesendeten Daten werden dann gesammelt übertragen und zeitfolgerichtig einsortiert, sodass eine lückenlose Aufzeichnung der Prozesswerte gewährleistet ist. Der IoT-Connector ist ein standardisiertes Softwaresystem auf Basis einer Linux-Distribution sowie einer selbst entwickelten NodeJS-Applikation. Die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Automatisierungs-Hardware (Siemens, Phoenix-Contact und Beckhoff) wurde erfolgreich getestet. Die Einbindung in das Schiffssystem erfolgt per TCP-Schnittstelle. Einrichtung und Überwachung des aktuellen Zustands des IoT-Connectors finden über die Webseite des internen Webserverns statt. Nach der Einrichtung ist es für den unbeaufsichtigten Dauerbetrieb vorgesehen.

Die verwendete Siemens Mindsphere Cloud ermöglicht es große Datenmengen aus unterschiedlichen Quellen entgegenzunehmen, schnell zu verarbeiten und zu verwalten. Neben dem Einsatz von Herstellerstandards können eigene Web-Applikationen bereitgestellt werden, um zusätzliche Formen der Prozessanalyse zu betreiben. Vor diesem Hintergrund wurde „OSCAR-Analysis“ entwickelt: eine in CloudFoundry gehostete Web-Applikation, in der alle zusammenlaufenden Daten getrennt nach Schiffen und Steuerungen in Form von Zeitreihendaten nahezu in Echtzeit überwacht werden können. Ferner wurde eine Möglichkeit geschaffen, Prozesseingriffe in Form von Sollwerten für definierbare Parameter eines Systems in der Mindsphere zu hinterlegen und so eine Fernsteuerung zu realisieren. Der IoT-Connector, dem die jeweilige Steuerung unterliegt, extrahiert diese Daten aus der Cloud und schreibt sie ins interne Steuerungsnetz des jeweiligen Schiffes. Eine Anbindung der Beobachter- und Prognosemodelle an die Cloud ist ebenfalls möglich. Die berechneten Werte können via ifakFAST an einen Modbus- oder OPC UA-Server gesendet und dort vom IoT-Connector abgegriffen werden. Alternativ kann die Kommunikation per CSV-Dateiexport/-import erfolgen (manuell oder skriptbasiert).

An der Versuchsanlage der LUH wurden die Funktionalität des IoT-Connectors und der Cloud-Applikationen anhand des Kommunikationsprotokolls Modbus TCP realisiert und erfolgreich getestet. Die Kommunikationsprotokolle sind dabei beliebig erweiterbar. Mit diesen Mitteln ist es möglich, eine Schiffsflotte zentral von einer Stelle zu managen und dabei vielfältige Prozessanalyse-Tools einzusetzen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die in OSCAR entwickelten Lösungen ermöglichen eine deutliche Verbesserung des Prozessmonitorings und die Optimierung des Betriebs, sowohl unmittelbar an Bord als auch durch ein zentrales Flottenmanagement an Land.

Das erarbeitete Messkonzept für die Schiffskläranlage wurde erfolgreich an Bord implementiert und wird von der Besatzung als hilfreiche Unterstützung wahrgenommen. Die gesammelten Erfahrungen verdeutlichen, dass die Auswahl geeigneter Messtechnik und Messstellen (Einbaumöglichkeiten, Eignung für hochkonzentrierte Abwässer), die fachkundige Begleitung der Inbetriebnahme und eine gute Kommunikation mit der Crew für die erfolgreiche Umsetzung wichtig sind. Angesichts des großen und noch weitgehend unerschlossenen Marktes für Abwassermesstechnik im maritimen Bereich ist zu hoffen, dass zukünftig besser auf die speziellen Anforderungen an Bord zugeschnittene Messtechnik verfügbar sein wird.

Das entwickelte Prognosemodell bietet erstmalig einen Ansatz zur Vorhersage des Tagesverlaufs des Anfalls von Abwasserteilströmen und Speiseresten auf Kreuzfahrtschiffen und gestattet damit präzise Aussagen bzgl. des Anlageninputs. Durch die Möglichkeit der situations- und schiffsspezifischen Anpassung der Modellparameter ist eine gute Übertragbarkeit auf spezifische Rahmenbedingungen auf Schiffen gegeben. Die Vorhersagegenauigkeit und Praktikabilität sind durch den Abgleich mit einer größeren Datenbasis sowie die praktische Nutzung weiter zu erproben und ggf. zu verbessern. Neben der hier fokussierten Anwendung zur Prognose im laufenden Betrieb bietet das Modell potenziell auch großen Nutzen zur Auslegung neuer Anlagen sowie zur Verfahrensoptimierung.

An der landseitigen Versuchsschiffskläranlage ist es gelungen, ein Online-Simulationsmodell einzurichten, das den aktuellen Zustand der Anlage mit Fokus auf die biologischen Prozesse in Echtzeit abbildet. Das erstellte Beobachtermodell kann zukünftig durch zusätzliche Modellbausteine um weitere Prozesse (bspw. Membranfiltration) und Größen (bspw. Energiebedarf) erweitert werden und damit die Grundlage für eine multi-kriterielle Betriebsoptimierung liefern. Im Zuge der weiteren Erprobung sind unter anderem die Übertragung auf Anlagen an Bord und die konkrete Einbindung in ein übergeordnetes Betriebsassistenzsystem wichtige Aspekte.

Mit dem IoT-Connector und der OSCAR-Analysis-Webapplikation steht eine in OSCAR erfolgreich getestete Lösung zur Anlagenfernüberwachung und -steuerung mit Schnittstelle zur Simulationsumgebung zur Verfügung, die speziell auf das Flottenmanagement zugeschnitten ist. Der IoT-Connector bietet hervorragende Voraussetzungen für die Integration in bestehende Systeme, da eine Vielzahl gängiger Kommunikationsprotokolle und -hardware unterstützt wird. Zukünftig sollen die IoT-Connector-Lösungen mit weiteren Cloud-Umgebungen erprobt werden. Eine so flexible und herstellerunabhängig einsetzbare Lösung ist bisher nicht am Markt erhältlich.

Neben dem maritimen Bereich können landseitige dezentrale Anlagen mit begrenzter Personalverfügbarkeit wie bspw. Kleinkläranlagen oder Biogasanlagen von den in OSCAR entwickelten Lösungen profitieren.

DANKSAGUNG

Das Projektkonsortium dankt dem BMWK für die Förderung und dem PtJ für die Administration und Unterstützung. Ferner bedanken wir uns für die Bereitstellung der zudosierten Substrate bei der Privatbrauerei Herrenhausen sowie der Kraul & Wilkening u. Stelling GmbH und für die Unterstützung des Versuchsanlagenbetriebs bei der RWO GmbH.

PSDMAN –

UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES VON PRE-SWIRL DUCTS/VORDRALLDÜSEN
AUF DIE MANÖVRIEREIGENSCHAFTEN VON VÖLLIGEN SCHIFFEN

AUTOREN

PROF. DR.-ING. MOUSTAFA ABDEL-MAKSOD	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, TUHH
CENG STEVE LEONARD	IBMV MARITIME INNOVATIONSGESELLSCHAFT MBH, IBMV
DIPL.-ING. LARS LÜBKE	SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT POTSDAM GMBH, SVAP
M.SC. PATRICK SUMISLAWSKI	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, TUHH
M.SC. MBA AHMED SAHAB	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, TUHH
M.SC. ARNE BROCKSTÄDT	BECKER MARINE SYSTEMS GMBH, BMS

1. EINLEITUNG

Mit der treibenden Kraft der EEDI- und EEXI-Anforderungen und den CII-Regularien der IMO steht die Verbesserung der Antriebsleistung von Schiffen im Mittelpunkt der hydrodynamischen Herausforderungen von heute. Durch den Einsatz innovativer CFD-Techniken (Computational Fluid Dynamics) wurden in den letzten zehn Jahren enorme Fortschritte bei der Erreichung dieses Ziels gemacht. Dazu gehören Optimierungen des Rumpfes, der Ruder und der Propeller, sowie der Einbau energiesparender Vorrichtungen wie z. B. Pre-Swirl-Ducts (PSDs) und im Speziellen die Mewis-Duct, die von BMS eingeführt wurde. BMS ist ein führender Hersteller von Manövrieranlagen für jeden Schiffstyp. Mit der Einführung der Mewis-Duct spezialisierte BMS sich auch auf Energy Saving Devices (ESDs), um ihren Kunden möglichst effiziente und umweltschonende Lösungen für deren Schiffsbetrieb zu gewährleisten. Die Maritime Innovationsgesellschaft mbH (IBMV) ist ein auf CFD-Berechnungen spezialisiertes Partnerunternehmen der BMS und betreut seit Jahren die numerische Berechnung der ESDs und deren Weiterentwicklung.

Bei der Auslegung und Optimierung der Mewis-Duct liegt der Schwerpunkt auf der Verbesserung der Propulsionseigenschaften. Um weitere Vorteile herauszuarbeiten, wurde in Zusammenarbeit von BMS/IBMV, dem Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie der TUHH (FDS) und der Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam GmbH der Einfluss von Vordralldüsen auf das Manövrierverhalten von vollen Schiffen untersucht. Das FDS arbeitet seit vielen Jahren an der Weiterentwicklung und Validierung von numerischen Methoden zur Strömungssimulation mit Fokus auf das maritime Umfeld. Das Institut verfügt über den größten Windkanal in Deutschland für maritime Anwendungen. Die SVA Potsdam hat sich u. a.

auf das Gebiet der Schiffspropulsion spezialisiert. Dies umfasst sowohl die Auslegung der Propulsionsanlagen für Neubauprojekte als auch Retrofits für die fahrende Flotte. Die SVA verfügt über die entsprechenden Versuchsanlagen zur Bestimmung der Propulsion und des Manövrierhaltens von Schiffen.

In dem FuE-Projekt wurde eine auf die Wechselwirkung zwischen Ruder und Propeller optimierte Mewis-Duct als ESD für völlige Massengutschiffe entworfen, welche in Steuerfunktionalität und Sicherheitsaspekten dem Stand der Technik überlegen ist. Die Forschungsaktivitäten stützten sich auf experimentelle Untersuchungen im Windkanal sowie im Schlepptank und auf numerische Verfahren zur Simulation von Schiffsumströmungen und -bewegungen. Zur Bestätigung der Untersuchungsergebnisse erfolgten zusätzlich Modell- und Freiwasserversuche.



Abb. 1: Ansichten von installierten Pre-Swirl Ducts

Besonders völlige Schiffe wie Tanker oder Bulk Carrier werden bevorzugt mit Energy Saving Devices (ESDs) ausgerüstet. Unter ESDs versteht man im Allgemeinen Maßnahmen und Methoden zur Einsparung von Energie im Schiffsbetrieb. Sie dienen der Verringerung von Strömungsverlusten, die vorwiegend am Hinterschiff entstehen. Daher befinden sich die ESDs im Hinterschiffsbereich, wobei in diesem Zusammenhang z. B. Düsen und Leitflossen oder Kombinationen von beiden, die Pre-Swirl Ducts (PSDs), zu nennen wären, siehe Abbildung 1. Im Gegensatz zu den zahlreichen Untersuchungen bezüglich des Einsparpotenzials der PSDs in Hinblick auf den Treibstoffverbrauch war der Einfluss von PSDs auf die Manöviereigenschaften von Schiffen bisher unzureichend untersucht. Die Installation einer PSD an einem Schiff führt zu einer Vergrößerung der lateralen Unterwasserfläche im Hinterschiffsbereich, was einen positiven Effekt auf die Kursstetigkeit und die Steuerbarkeit des Schiffes mit sich bringt. Gerade völlige Schiffe sind für verminderte Kursstetigkeit bzw. ein gierinstabiles Verhalten anfällig.

Der für Forschungszwecke häufig verwendete "Japan Bulk Carrier" (JBC) wurde für dieses Projekt als Grundlage für die CFD-Simulationen und Modellversuche ausgewählt. Der Japan Bulk Carrier (JBC) wurde als öffentlich zugänglicher Testcase für völlige Schiffe von NMRI entwickelt. Das völlige Massengutschiff wurde im Rahmen von unterschiedlichen Workshops untersucht, sodass eine fundierte Basis von Daten frei zur Verfügung steht. Außerdem verfügt der JBC über eine Stromausgleichsdüse (Wake Equalising Duct WED).

Um die Verwendung größerer PSD-, Propeller- und Rudermodelle und damit qualitativ bessere Kraft- und Strömungsfeldmessungen zu ermöglichen, wurde auch eine verkürzte "Dummy"-Version des JBC-Modells im Maßstab 1:40 für die Anwendung im Windkanal entwickelt. Anhand des Dummy-Modells wurde die Rumpfp-Propeller-Düse-Ruder-Interaktion intensiv untersucht.

2. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

2.1 Modellversuche im WINDKANAL

Der Einsatz von Düsen im Hinterschiffsbereich folgt dem Ziel, das Nachstromfeld hinsichtlich der Propulsionseigenschaften positiv zu beeinflussen. An der TUHH wurden Windkanalversuche durchgeführt, um das Nachstromfeld des JBC mit und ohne PSD zu bestimmen. Im Vergleich zu Versuchen im Schlepptank ist die Messzeit unbegrenzt, und der technische Aufwand zur Einhaltung reproduzierbarer Versuchsbedingungen ist vergleichsweise gering, da das Schiffsmodell feststeht und die notwendige Messtechnik stationär betrieben werden kann.

Die Untersuchungen an der TUHH wurden im Niedergeschwindigkeitswindkanal im geschlossenen Betrieb (Göttingen-Konfiguration) durchgeführt. Diese Konfiguration ermöglicht es, die Temperatur und Eigenschaften des Luftstroms konstant zu halten, was wiederum zu einer konstanten Reynoldszahl von $2,42 \times 10^6$ führt.

Die Untersuchungen wurden sowohl für das Doppelrumpf- (Abbildung 2) als auch für das Dummymodell (Abbildung 3) mit verschiedenen Kombinationen von Anhängen, sowohl bei Geradeausfahrt als auch bei 8° Driftwinkel, durchgeführt. Durch Einführung einer Symmetrieebene entlang der Entwurfs-Wasserlinie, an der das Modell gespiegelt wird, entsteht das Doppelrumpfmodell. Zur Messung des Nachstroms eines Doppelrumpfmodells wird im Windkanal das PIV-Verfahren (Particle Image Velocimetry) eingesetzt. Bei größeren Driftwinkeln wird die Strömung um den Schiffsrumpf durch großflächige Ablösung und instationäre Wirbelstrukturen charakterisiert. Für die Strömungsmessungen wurde ein tomographisches PIV-Messverfahren eingesetzt, welches das Geschwindigkeitsfeld dreidimensional aufnimmt, wodurch hochwertige Messergebnisse gewonnen wurden, die für die Bewertung der Funktionalität von PSDs von großer Bedeutung sind.



Abb. 2: JBC Doppelrumpfmodell

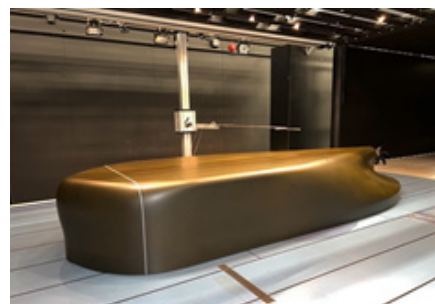


Abb. 3: JBC Dummymodell

Im Laufe des Projekts wurden die JBC-Modelle in verschiedenen Konfigurationen untersucht, wie in Tabelle 1 dargestellt. Für die verschiedenen Kombinationen wurden sowohl Kraft- als auch PIV-Messungen durchgeführt. Für das Dummy-Modell erfolgten für ausgewählte Fälle intensive Strömungsvisualisierungen mit Hilfe von Rauch und Laser, um die Auswirkungen der verschiedenen Anhänge auf die Strömungsstruktur sowohl bei Geradeausfahrt als auch bei reinem Drift zu untersuchen.

Tabelle 1: Untersuchten Konfigurationen für das JBC Doppelrumpf- und Dummymodell (R: Ruder, D1: WED, D2: PSD, P: Propeller)

Konfiguration	JBC Doppelrumpfmodell		JBC Dummymodell	
	$\beta=0^\circ$	$\beta=8^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=8^\circ$
RODOPO	X	X	X	X
RODOP1		X	X	X
ROD1PO	X			
ROD1P1	X	X		
R1DOPO	X			
R1DOP1			X	X
R1D1PO	X			
R1D1P1		X		
ROD2PO			X	X
ROD2P1	X	X	X	X
R1D2P1		X	X	X
R2DOP1			X	X
R2D2P1			X	X

Die Messstationen, die mit dem neu angeschafften tomografischen TPIV-System untersucht wurden, sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Tabelle zeigt alle untersuchten Messstationen für den Fall des Rumpfes ohne Anhänge. Für andere Konfigurationen wurden nur bestimmte Messstationen untersucht. Für den Fall des Schiffskörpers ohne Anhänge wurden verschiedene Wirbelstrukturen wie der Aft-Body Vortex (ABV) und der Fore-Body Side Vortex (FSV) bei Geradeausfahrt sowie stationärer Schräganströmung untersucht. Die Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen von Untersuchungen verglichen, die mit dem Vorgängermodell des stereoskopischen SPIV-Systems durchgeführt wurden und in der Veröffentlichung (Sahab et al. 2022, Experimental Investigation on the Wake of the Japan Bulk Carrier Model with Stereoscopic and Tomographic Particle Image Velocimetry) vorgestellt werden.

Tabelle 2: Messtation für Nackt-Rumpf-Fall (Doppelrumpfmodell)P

Plane	x_s [mm]	x_s/L_{pp} [-]	SPIV	ABV	FSV
S7'	-062.9	-0.0179		X	X
S7 (AP)	000.0	0.0000	X	X	X
S6	027.1	0.0077	X	X	
S5	047.8	0.0136	X		
S4	055.2	0.0157	X	X	
S4'	066.4	0.0189		X	
S3	074.3	0.0211	X		
S3'	098.4	0.0280		X	
S2	131.7	0.0375	X		
S1	175.7	0.0500	X	X	X
X0p10	351.3	0.1000			X
X0p15	527.0	0.1500			X
X0p20	702.6	0.2000			X

Das neue TPIV-System besteht aus vier Phantom Veo 440L 4MP-Kameras mit Nikkor 180mm/F2.8-Objektiven, einem 40 mJ Nd:YLF-Doppelkavitätenlaser, einem Laserarm zur Führung des Lasers und einer Laseroptik zur Ablenkung des Lasers in das erforderliche Laservolumen. Die Messungen werden mit einer räumlichen Auflösung von 1.1 mm und einer zeitlichen Auflösung von 2 ms durchgeführt. Das System liefert aufgrund seiner hohen zeitlichen Auflösung wesentlich zuverlässigere Daten zur Bewertung der turbulenten kinetischen Energie (TKE) als das SPIV-System, dessen Messfrequenz lediglich 138 ms betrug. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen ein Beispiel für den TKE mit beiden Systemen an der Messtation S7 im Driffall. Das neue System ist in der Lage, eine klare Struktur des Strömungsfeldes darzustellen, was mit dem SPIV-System nicht der Fall war.

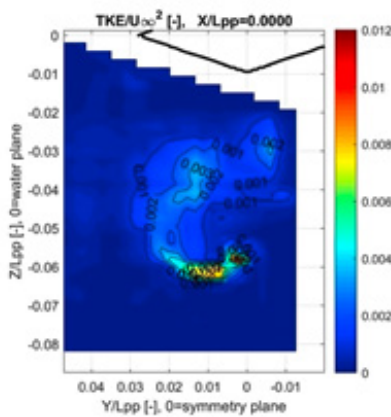


Abb. 4: TKE bei S7 mit SPIV im Driffall

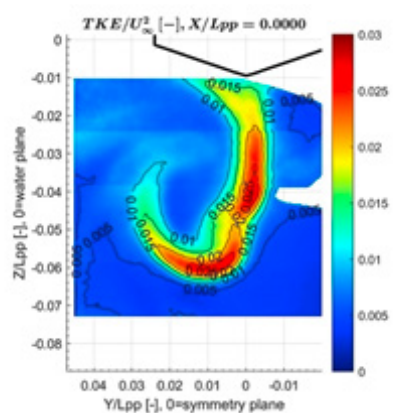


Abb. 5: TKE bei S7 mit TPIV im Driffall

Da beim TPIV-System im Vergleich zu einer Ebene sofort ein ganzes Volumen erfasst wird, können alle Komponenten des Wirbelvektors und des Reynoldsspannungstensors bestimmt werden. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen beispielhaft eine Komponente des Reynoldsspannungstensors bzw. eine Wirbelkomponente in der Messebene S7 bei Geradeausfahrt.

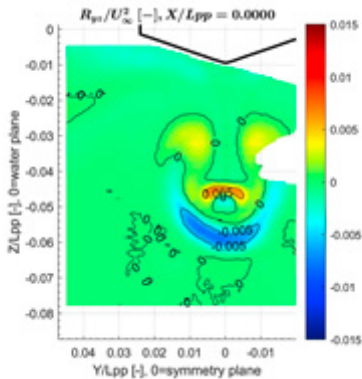


Abb. 6: $v'w'$ Komponente des Reynoldsspannungstensors

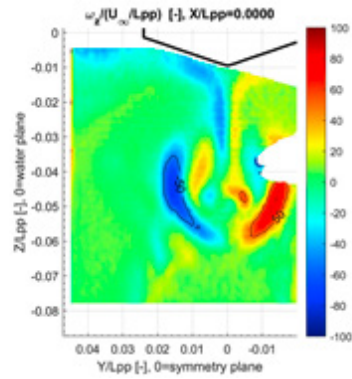


Abb. 7: Wirbelstärke um die z-Achse

Neben den quantitativen Untersuchungen wurden qualitative Untersuchungen an den Modellen durchgeführt, um deren Strömungsstrukturen mittels Rauch zu visualisieren. Solche Untersuchungen sind notwendig, um die komplexe Strömungsstruktur sowie die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Wirbelsystemen sichtbar zu machen und die relevanten Gebiete zu definieren, in denen die intensiven quantitativen Messungen durchgeführt werden sollen. Abbildung 8 und Abbildung 9 veranschaulichen die Strömungsstruktur stromabwärts des Ruders für gerade und schräge Anströmung des Dummymodells mit allen Anhängen. ABV und Scherschicht sind in beiden Fällen deutlich sichtbar. Bei Schräganströmung ist auch der vom Ruder abgelöste Spitzenwirbel gut erkennbar.

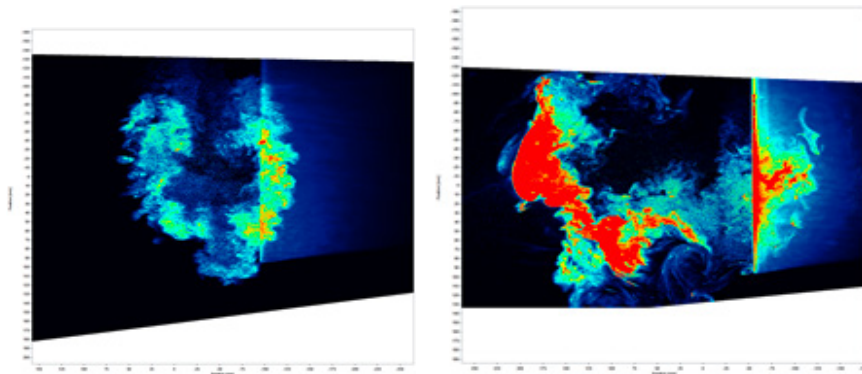


Abb. 8: Visualisierung der Strömung hinter dem Dummy-Modell bei paralleler Anströmung

Abb. 9: Visualisierung der Strömung hinter dem Dummy-Modell bei Schräganströmung

2.2 Modellversuche IM Schlepptank und Freiwasserversuche

Um Aussagen über das Manövrierverhalten mit und ohne PSD treffen und um die numerischen Verfahren validieren zu können, wurden an der SVAP Modellversuche im Schlepptank sowie Freiwasserversuche durchgeführt. Die Versuchsmatrix umfasste Widerstands- und Propulsionsversuche, Zickzack-Tests, Kreis- und Spiralmanöver mit unterschiedlichen Konfigurationen aus Rumpf, Propeller und Düse. Auf dieser Grundlage wurde der Einfluss der Düse auf das Manövrierverhalten herausgearbeitet.

In der Schlepprinne der SVAP wurden vergleichende Widerstands- und Propulsionsversuche mit unterschiedlichen Konfigurationen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass unter Annahme einer zur Verfügung stehenden Leistung von $P_D = 15000\text{ kW}$ mit der PSD eine um ca. 0.6 kn höhere Geschwindigkeit erzielt werden kann als für das Schiff ohne Düse. Mit der Ausgangsdüse ergibt sich eine nur halb so hohe Geschwindigkeitserhöhung, siehe Abbildung 10 links. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen mit einer weiteren optimierten PSD und Propeller kleinere Effizienzgewinne. Mit der Freigabe der Drehzahl kann mit der optimierten Düse und dem optimierten Propeller eine um ca. 0.15 kn höhere Geschwindigkeit erreicht werden, siehe Abbildung 10 rechts. Für alle untersuchten Varianten wird ein hoher Propulsionsgütegrad erzielt.

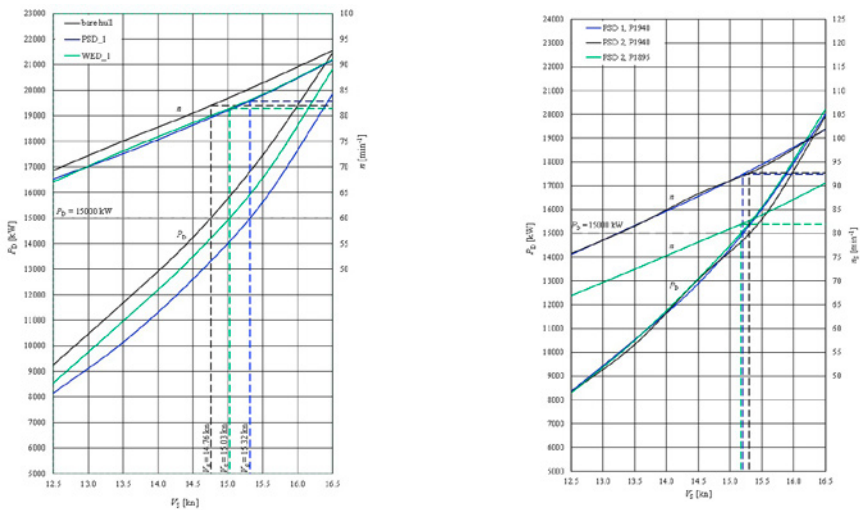


Abb. 10: Geschwindigkeitsprognose für unterschiedliche Düsen mit dem Ausgangspropeller (links) und für die optimierten Varianten (rechts)

In Abbildung 11 werden exemplarisch für die durchgeführten Freiwasserversuche Ergebnisse eines Spiraltests dargestellt. Die Tests wurden ohne und mit Düse durchgeführt. Die Modelltrajektorien und die Propeller-, Düsen- und Ruderkräfte wurden für alle Manöver aufgezeichnet.

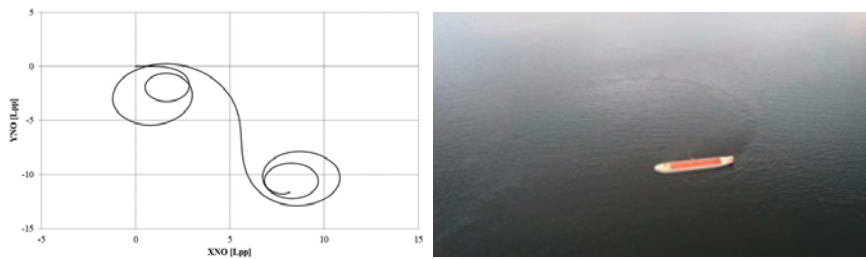


Abb. 11: Manövrierversuche am Beispiel eines Spiraltests, Trajektorien (links), Drohnenfoto des Freifeldversuchs (rechts)

Zur Bestimmung der Düsenkräfte beim Manövrieren wurde ein 3-Komponenten-Messsystem von der SVAP erfolgreich entwickelt und erprobt. Das System ist in den Schiffsrumpf integriert und somit minimal invasiv. Mit dem Messsystem ist es möglich, die Lastspitzen an der Düse während des Manövrierens zu bestimmen und damit die notwendigen Daten für eine präzisere strukturelle Auslegung der Düsen bereitzustellen. In Abbildung 12 werden die Düsen- (PSD) und Ruderkräfte exemplarisch für einen Drehkreisversuch bei einem Ruderwinkel von $\delta = 35^\circ$ abgebildet. Es zeigt sich, dass z. B. die axiale Düsenkraft im Drehkreis deutlich kleiner als die Quer- und Vertikalkraft ist. Die Vertikalkraft wird relativ weniger beeinflusst durch die Kreisfahrt, ist aber absolut gesehen die dominierende Kraftgröße.

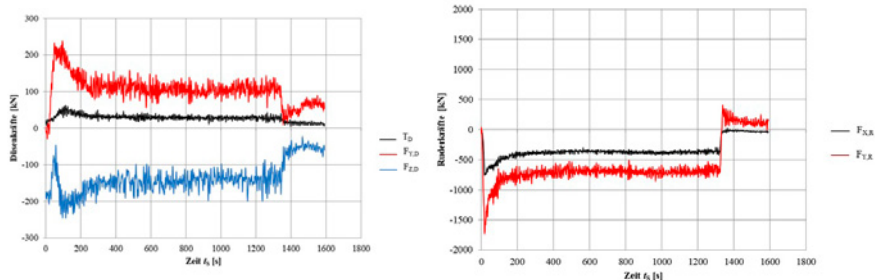


Abb. 12: Drehkreisfahrt $\delta=35^\circ$ Backbord, Düsenkräfte (links), Ruderkräfte (rechts)

Zur Beurteilung der Manöviereigenschaften der unterschiedlichen Schiff-Düse-Propeller-Konfigurationen wurde die Gierstabilität herangezogen. Die Gieraten wurden im Rahmen von Spiraltests für unterschiedliche Ruderwinkel mit Winkelschritten von 5° bzw. von 2° ermittelt. Bei der Drehrichtung nach Backbord traten größere Unterschiede in den Gieraten auf. Durch den Einsatz einer PSD kann der gierinstabile Bereich, wie in Abbildung 13 dargestellt, nachweislich reduziert werden. Somit ist das Hauptziel des Vorhabens, die Verbesserung der Manöviereigenschaften von völligen Schiffen, vollumfänglich erreicht.

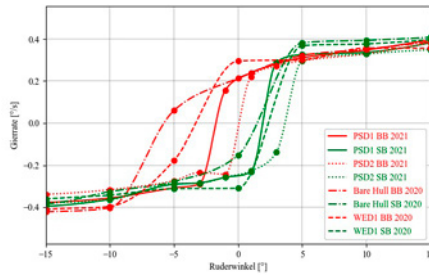


Abb. 13: Vergleich der Gierstabilität, Anfangsrichtung nach Backbord (rot) und nach Steuerbord (grün)

3. NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die Entwicklung und Anwendung von numerischen Verfahren zur Simulation von Strömungen und Schiffsbewegungen stellt eine Kernkompetenz der an dem Forschungsvorhaben teilnehmenden Institutionen dar. In den letzten Jahren hat durch Steigerung der Rechenkapazitäten der Umfang der Integration der numerischen Simulationsverfahren in den Entwurfsprozess erheblich zugenommen. Umso wichtiger war es, die durch die IBMV erzeugten numerischen Ergebnisse mithilfe von hochauflösenden Messungen aus dem Windkanal sowie Modellversuchen von Manövern im Schlepptank sowie im Freifeld zu validieren. Da bei einem manövrierenden Schiff umfangreiche Wirbelstrukturen entstehen, die vom Schiffskörper abgehen, ist für eine zuverlässige Prognose eine möglichst genaue Abbildung der Wirbelstrukturen innerhalb der numerischen Simulation unabdingbar. Durch eine detailreiche numerische Simulation können die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Wirbeln und die Phänomenologie der turbulenten Strömung tiefgehend untersucht werden, insbesondere die Beeinflussung des Nachstromfeldes durch die Wirbelstruktur am Hinterschiff. Eine möglichst genaue Erfassung der Schiffsumströmung erhöht die Zuverlässigkeit der Prognose der Manöviereigenschaften.

3.1 Simulation der Umströmung des JBC-Modells im Windkanal

In numerischen Simulationen sind die Genauigkeit der Auflösung der stationären Wirbel, die entlang des Schiffsrumpfes entstehen, und die Quantifizierung ihrer Stärke Teil aktueller Forschungsarbeiten (siehe Visonneau, et al., 2016, Shevchuk, et al., 2020). Dieses Thema ist besonders wichtig für den stationären Driftzustand, bei dem die Wirbelstrukturen einen erheblichen Einfluss auf die Wechselwirkung zwischen Rumpf und Propeller haben können und zu hohen Schwankungen der Propeller- und Rumpfdriftkräfte führen. Im Fokus der numerischen Untersuchungen stand die Rumpf-Propeller-Interaktion des JBC-Rumpfes unter stationären Driftbedingungen.

Die numerischen Simulationen wurden für den JBC-Rumpf mit und ohne Propeller bei stationärer Schräganströmung durchgeführt. In den Simulationen der Driftbewegung ohne Propeller wurde die Strömung in Bezug auf die lokale Geschwindigkeit, die Wirbelstärke sowie turbulente kinetische Energie (TKE) untersucht. Darauf aufbauend wurden

Simulationen mit einem aktiven Propeller für positive und negative Drift sowie für die Geradeausfahrt durchgeführt.

Grundsätzlich besteht die Strömung um den JBC-Rumpf bei stationärer Schräganströmung aus zwei dominanten Wirbelstrukturen. Der erste Wirbel entsteht durch eine kontinuierlich stattfindende Ablösung an der vorderen Schulter, siehe Abbildung 14 (FSV). Dieser Wirbel gewinnt durch die kontinuierliche Ablösung stromabwärts an Energie. Im hinteren Bereich des Schiffes kommt es zu einer weiteren großflächigen Ablösung, die sich über die gesamte hintere Schulter erstreckt (ABV). Dieser Wirbel ist stärker im Vergleich zum ersten Wirbel. Messergebnisse der beiden Wirbelstrukturen sind in Abbildung 15 dargestellt.

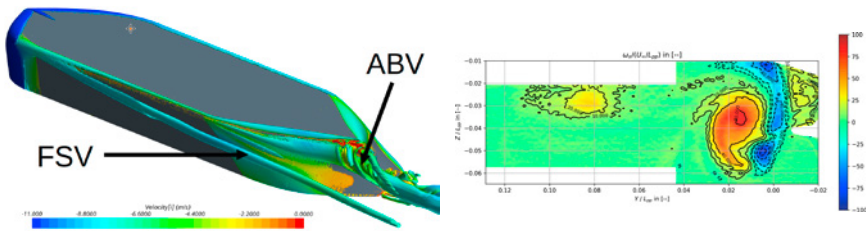


Abb.14: Wirbelsystem bei stationärer Schräganströmung, Rechenergebnisse
Abb. 15: Axiale Wirbelstärke, Messungen im Windkanal

Im Folgenden werden einzelne Aspekte des Strömungsfeldes um den JBC-Rumpf bei Schräganströmung betrachtet. Die zeitlich gemittelte Wirbelstärke in ausgewählten Ebenen sowie die Wandschubspannung und die Stromlinien im wandnahen Bereich sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt. Für die numerische Simulation wurde das Hybridverfahren IDDES $k-\omega$ -SST verwendet. Es ist zu erkennen, dass bei dem hybriden Modellierungsansatz die Ablösung bereits im Vorderteil zu komplexeren Strömungsverhältnissen führt. Die Ablösung wird auch durch geringe Wandschubspannungen deutlich. Der FSV induziert darüber hinaus hohe Schubspannungen im körpernahen Bereich durch erhöhte Geschwindigkeiten und damit Unterdruck.

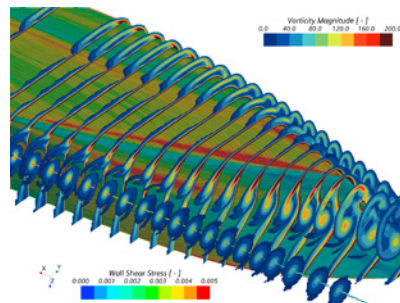
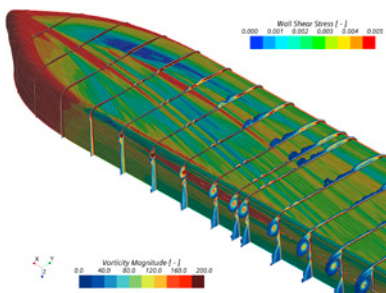


Abb. 16: Wirbelstrukturen und Wandschubspannung am Vorschiff, IDDES
Abb. 17: Wirbelstrukturen und Wandschubspannung am Hinterschiff, IDDES

Zur Veranschaulichung der Wirkung der instationären Wirbelstrukturen auf die Strömung am Rumpf sind in Abbildung 18 die aus den IDDES-Ergebnissen ermittelte Varianz des Oberflächendrucks und die Varianz der Wandschubspannung dargestellt. Bereiche, in denen diese Werte ansteigen, sind besonders von der Unstetigkeit der Umströmung des Schiffskörpers betroffen. Vor allem wird die Fluktuation im Heck des JBC-Rumpfes deutlich.

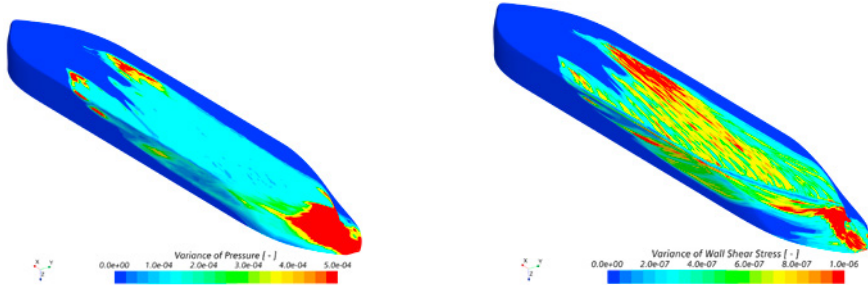


Abb. 18: Varianz des Drucks und der Oberflächen-Schubspannung, IDDES

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen für das Schiffmodell mit arbeitendem Propeller beschrieben. Besonders für völlige Schiffe wie das JBC ist es aufgrund der Wechselwirkung mit dem Propeller von großer Bedeutung, zwei verschiedene Zustände zu untersuchen: positiver Drift ($+\beta$, der Bug des Schiffes ist nach Backbord gerichtet) und negativer Drift ($-\beta$, der Bug des Schiffes ist nach Steuerbord gerichtet). Da das Nachstromfeld je nach Driftwinkel stark variiert, arbeitet der Propeller bei gleichem Driftwinkel in unterschiedlichen Betriebspunkten, je nachdem, ob der Driftwinkel positiv oder negativ ist.

Der Einfluss des Driftwinkels auf die Iso-Fläche des Q-Kriteriums ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Wechselwirkung des ABV mit dem Propeller hängt stark von der Drehrichtung des Wirbels ab. Bei positivem Driftwinkel ist die Drehrichtung des ABV mit der Drehrichtung des Propellers identisch, während sie bei negativem Driftwinkel gegenläufig ist. Im Ergebnis zeigt sich eine andere Strömungsstruktur stromabwärts.

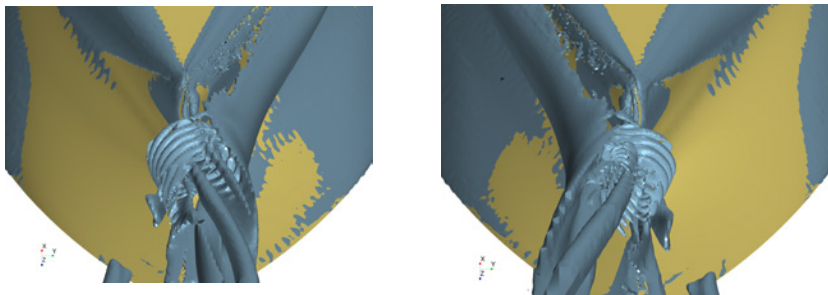


Abb. 19: Iso-Oberflächen der Wirbelstrukturen für positiven (links) und negativen (rechts) stationären Driftwinkel

Abbildung 20 zeigt die Änderung des dimensionslosen Manövrierkoeffizienten der Querkraft (F'_v) und des Giermoments (N'_v) in Abhängigkeit von der Quergeschwindigkeit v , die mittels der Simulation der stationären Schräganströmung bei einem Driftwinkel bestimmt wurde und auf den Rumpf ohne Anhänge bezogen ist. Es ergibt sich aus der Kombination aus Ruder (R), Propeller (P) und Düse (D1) sowie PSD (D2) eine Vielzahl an Konfigurationen. Es wird zwischen positivem ($+\beta$) und negativem Driftwinkel ($-\beta$) differenziert.

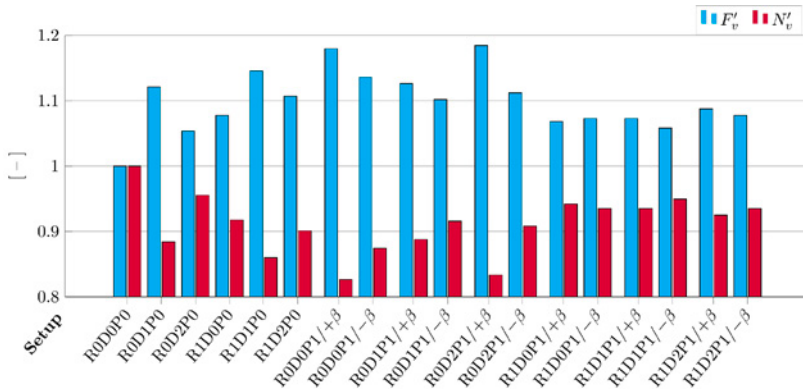


Abb. 20: Manövrierkoeffizienten bei stationärer Schräganströmung für verschiedene Konfigurationen

Aus diesen Daten lassen sich folgende Erkenntnisse für Konfigurationen sowohl mit als auch ohne Propeller ableiten:

- > Die JBC-Düse erhöht den Querkraftkoeffizienten F'_v deutlich und reduziert den Giermomentenkoeffizienten N'_v .
- > Der PSD erhöht ebenfalls den Querkraft- und verringert den Giermomentenkoeffizienten, jedoch nicht in gleichem Ausmaß.

Die Reduzierung des Giermomentenkoeffizienten N'_v bei gleichzeitiger Erhöhung des Querkraftkoeffizienten F'_v führt zu einer Erhöhung der Gierstabilität des Schiffes.

Für Details zur Untersuchung der Umströmung des JBC-Rumpfes und der Rumpf-Propeller-Interaktion siehe Sumislawski et al. 2022.

3.2 Simulationen von Drehkreis- und Zickzack-Manöver

Bei den durch die IBMV durchgeführten Simulationen des Manövrierverhaltens des Schiffes wurde der Propeller als Aktuatordisk modelliert, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist, dass ein Aufeinandertreffen unterschiedlicher Zeitskalen vermieden wird. Bei einem rotierenden Propeller sollte die Zeitschrittweite so gewählt werden, dass sich die Propellerblätter von einem Zeitschritt zum nächsten nur geringfügig drehen, typischerweise sind dies 2° Drehung. Im Zusammenhang mit dem Schiffsmanöver ist diese Zeitschrittgröße jedoch sehr klein, was bei der Modellierung konkurrierender Standardmanöver zu langwierigen Berechnungen führen würde.

Das CFD-Modell ist auch insofern vereinfacht, als Roll-, Tauch- und Stampfbewegungen des Schiffes vernachlässigt werden und die freie Wasseroberfläche als ebene Symmetrieebene modelliert wird. Die Steuerung des Ruderwinkels erfolgt durch externe Makros, und die Simulationen sind so aufgebaut, dass ein Wechsel zwischen verschiedenen Manövern durch die entsprechende Anpassung des Makros möglich ist. Zu Realisierung der Ruderdrehungen wurde die Overset-Mesh-Technik durchgängig verwendet.

Es wurden Simulationen für 35°-Drehkreis-, 10°/10°-Zickzack- und 35°-Spiralmanöver mit und ohne eingebaute PSD durchgeführt. Abbildung 21 zeigt als Beispiel einen Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Seitenkraft auf die PSD für das Steuerbord-Wendekreis-Manöver.

Die CFD-Ergebnisse sind in grün dargestellt, die gemessenen Daten in rot. Die Rechen- und Messergebnisse zeigen weitgehend eine gute Übereinstimmung. Erwartungsgemäß treten Ungenauigkeiten in einem kleinen Bereich während des anfänglichen dynamischen Übergangs in den stabilen Wendekreis auf, und sie nehmen im weiteren Verlauf des Manövers ab. Hierfür könnten bei der numerischen Simulation u. a. die Unterdrückung der Rollbewegung und die begrenzte Gitterauflösung die Ursachen sein. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse der Modellversuche im Gegensatz zur numerischen Simulation Umwelteinflüsse enthalten, da alle Manövriertests unter freiem Himmel in einem See erfolgten, der thermischen Strömungen, Restwellen von vorbeifahrenden Booten und Wind ausgesetzt war.

Abb. 22 zeigt einen Vergleich des 10°/10° Zickzack-Manövers.

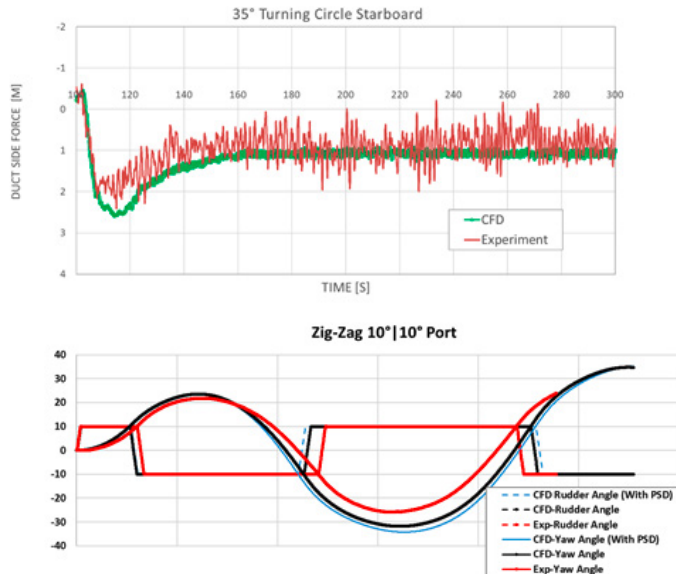


Abb. 21: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Düsenseitenkraft während des Drehkreismanövers
Abb. 22: Vergleich der Ergebnisse des Zickzack-Manövers 10°/10°

Die roten Kurven zeigen die im von der SVAP im Freifeldversuch gemessenen Daten ohne PSD-Anpassung, die schwarzen die Ergebnisse der CFD-Simulation, ebenfalls ohne PSD-Anpassung, und die blauen die CFD-Ergebnisse mit PSD-Anpassung. Die Vorhersagen des ersten Überschwingwinkels stimmen gut mit den gemessenen Daten überein, allerdings entwickelt sich der Fehler mit fortschreitender Simulation. Mit eingebauter PSD sagen die CFD-Simulationen etwas höhere erste und zweite Überschwingwinkel voraus, was angesichts der durch die Umgebungsbedingungen bedingten Genauigkeitseinschränkungen gut mit den Messdaten übereinstimmt.

Wie aus Abbildung 22 ersichtlich ist, haben der erste und der zweite Überschwingwinkel zugenommen. Dies stellt eine Bestätigung der erhöhten Kursstabilität dar.

Abbildung 23 zeigt die sehr unterschiedlichen Strömungsbedingungen auf die PSD, wenn das Zickzack-Manöver fortschreitet. Das linke Bild zeigt die berechnete Druckverteilung und die begrenzenden Stromlinien bei maximaler Giergeschwindigkeit, wenn sich das Schiff nach Steuerbord dreht, das rechte Bild, wenn es sich nach Backbord dreht.

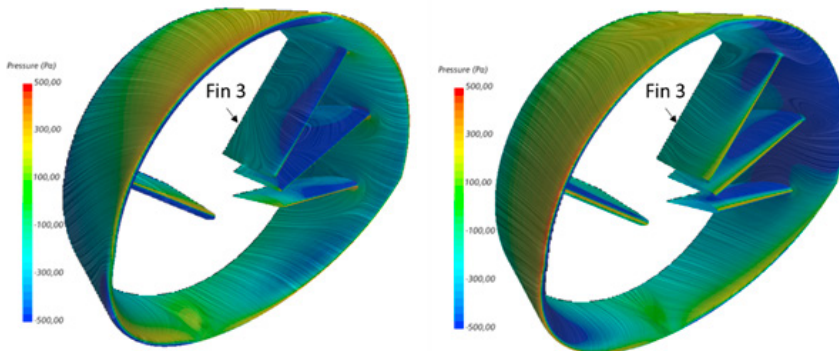


Abb. 23: Druckverteilung und Stromlinien bei 10°/10° Zickzack-Manöver bei maximaler Drehrate (links) Richtung Steuerbord und (rechts) Richtung Backbord

ZUSAMMENFASSUNG

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass das Manörierverhalten und die Wechselwirkung einer PSD mit dem Schiffsrumpf und weiteren Anhängen beurteilt und quantifiziert werden kann. Die positive Auswirkung einer PSD auf die Kursstetigkeit führt zu einer erhöhten Sicherheit bei der Ausführung von Manövern und einem geringeren Treibstoffverbrauch bei Geradeausfahrt. In erster Linie ist dies durch die zusätzliche Lateralfäche und strömungsrichtende Maßnahmen im Hinterschiffsbereich begründet. Mit diesem neuen Kenntnisstand kann BMS weiterhin seine dominierende Rolle bei den ESDs auf dem Weltmarkt behaupten.

Das Forschungsprojekt hat dem Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie ermöglicht, die eingesetzten numerischen Verfahren zur Simulation von Strömungen und Schiffsbewegungen fundamental zu validieren und weiterzuentwickeln. Für diesen Zweck wird ein modernes tomographisches PIV-System für schiffbauliche hydrodynamische Anwendungen im Windkanal der TUHH eingesetzt. Das System ermöglicht die gleichzeitige Messung von räumlichen 3D-Geschwindigkeitsfeldern mit höherer zeitlicher Auflösung. Dadurch ist die Bestimmung der turbulenten Größen wie Reynolds'scher Spannungstensor und kinetische turbulente Energie in einem Volumen möglich. Mithilfe dieses Verfahrens werden auch die komplizierten und hochfrequenten Wirbelstrukturen in Raum und Zeit im Nachstrom eines Schiffes erfasst.

Die SVA Potsdam bietet bei Neubauprojekten oder Retrofits Versuche und Berechnungen verschiedener Manöver an, um die Sicherheit von Schiffen zu erhöhen. Die im Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse erweitern das Leistungsspektrum der SVA und sichern den Wissensvorsprung auf diesem Gebiet in Deutschland. Zudem wurden im Rahmen des Vorhabens an der SVA Potsdam neue Messkonzepte und -techniken entwickelt und erprobt. Mit der Etablierung der innovativen Messtechniken, die mittelfristig im kommerziellen Bereich der Schiffbauforschung übernommen werden, werden national wie international Wettbewerbsvorteile geschaffen, welche die kommerzielle Vermarktung dieser Messtechniken unterstützen und die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten erhöhen.

Durch den Zusammenschluss des Konsortiums unter verstärkter Einbindung der Industrie wurde ein lösungsorientiertes Netzwerk geschaffen. Die entwickelten Verfahren und Erkenntnisse wurden schnell in die Praxis überführt. Weiterhin wurden die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen veröffentlicht und damit einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht.

DANKSAGUNG

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Verbundvorhabens. Ein besonderer Dank gilt dem Projektträger Jülich für die stets zuvorkommende und kompetente Betreuung des Vorhabens und die gute Zusammenarbeit.

LITERATUR

- [1] Sahab, A., Sumislawski, P., Abdel-Maksoud, M., "Experimental investigation on the wake of the Japan Bulk Carrier model with Stereoscopic and Tomographic Particle Image Velocimetry .", 34th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, United States, 2022
- [2] Sumislawski, P., Sahab, A., Shevchuk, I., Abdel-Maksoud, M., "Numerical investigation of the JBC hull and propeller interaction under static drift condition", 34th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, United States, 2022
- [3] M. Visonneau, G.B. Deng, E. Guilmineau, P. Queutey and J. Wackers, "Local and Global Assessment of the Flow around the Japan Bulk Carrier with and without Energy Saving Devices at Model and Full Scale", Proceedings of the 31th Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, California, United States, 2016
- [4] I. Shevchuk, A. Sahab and M. Abdel-Maksoud, "Experimental and numerical studies of the flow around the JBC hull form at straight ahead condition and 8° drift angle", 33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Osaka, Japan, 2020.

FOULLAS –

FOULINGENTFERNUNG VON MARITIMEN OBERFLÄCHEN MITTELS
LASERSTRAHLUNG UNTER WASSER

AUTOREN

STANISLAV ZIMBELMANN	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
DR.-ING. BENJAMIN EMDE	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
DR.-ING. JÖRG HERMSDORF	LASER ZENTRUM HANNOVER E.V.
TIM HEUSINGER VON WALDEGGE	FRAUNHOFER IFAM
DR. DOROTHEA STÜBING	FRAUNHOFER IFAM
DR.-ING MARKUS BAUMANN	LASERLINE GMBH

1. EINLEITUNG UND MOTIVATION

Mariner Bewuchs ist seit jeher eine Herausforderung für die Schifffahrt. Aufgrund seiner negativen Auswirkungen auf den Reibungswiderstand eines fahrenden Schiffes und den damit einhergehenden sekundären Effekten, wie höherer Treibstoffverbrauch sowie der Anstieg von umweltschädlichen und z.T. giftigen Emissionen, forschen weltweit Unternehmen und Forschungseinrichtungen an Lösungen zur Bewuchsvermeidung. Als zusätzlicher Aspekt ist die Artenverschleppung in den vergangenen Jahren stärker in den Fokus gerückt, was sich auf unterschiedlichen Ebenen, von der IMO (International Maritime Organization) bis hin zu einzelnen Ländern (Australien und Neuseeland) und Bundesstaaten (Kalifornien), in einer strenger werdenden Gesetzgebung widerspiegelt. Grund hierfür ist, dass Schiffe als Vektoren für die Verschleppung invasiver Spezies eine tragende Rolle spielen. Nachdem das Ballastwasser-Übereinkommen der IMO (in Kraft seit 8. September 2017) hier der erste Schritt zur Reduzierung war, steht der Schiffsrumpf nun im Fokus des Interesses. Die Auswirkungen der Artenverschleppung beschränken sich nicht nur auf negative Einflüsse auf die Artenvielfalt in ihrer natürlichen Zusammensetzung, sondern invasive Arten verursachen auch enorme wirtschaftliche Schäden in der Fischerei durch Verdrängung von Arten, in der Industrie durch übermäßige Besiedelung von Kühlwasserversorgungen oder auch im Tourismus durch eingeschleppte gefährliche Arten.

Das Ziel des Forschungsvorhabens »Foullas« ist es, den Bewuchs an Schiffsrümpfen effizient, oberflächen- und umweltfreundlich mittels Laserstrahlung unter Wasser zu entfernen. Die Abbildung 1 veranschaulicht den Prozess mit den unterschiedlichen Schichten auf der Probenoberfläche. Im Vordergrund steht die laserinduzierte, letale (tödliche) Schädigung der bei Soft-Fouling vorliegenden Mikroorganismen und deren Zellverbände (Schicht a), um daraufhin durch die Wasserströmung während der Fahrt des Schiffes einen Reinigungseffekt zu erzielen. Gleichzeitig wird die Unversehrtheit existenter Schutz-

schichtsysteme evaluiert (Schicht b). Darauf aufbauend wird der Einsatz von Laserstrahlung auch gegen Hard-Fouling (hierzu zählen beispielsweise Seepocken etc.) untersucht. Es wird sichergestellt, dass die lackbasierten Antifouling- und Korrosionsschutzsysteme bzw. die Materialschichten selbst, durch die Wahl geeigneter Prozessparameter und Beschichtungssysteme nicht beschädigt werden. Zur Durchführung des Projektes unter praxisnahen Bedingungen wurde ein Demonstrator entwickelt, der eine Bestrahlung von Bewuchsproben in einer realitätsnahen Einsatz- und Betriebsumgebung in der Dauertauchzone auf Helgoland ermöglicht.

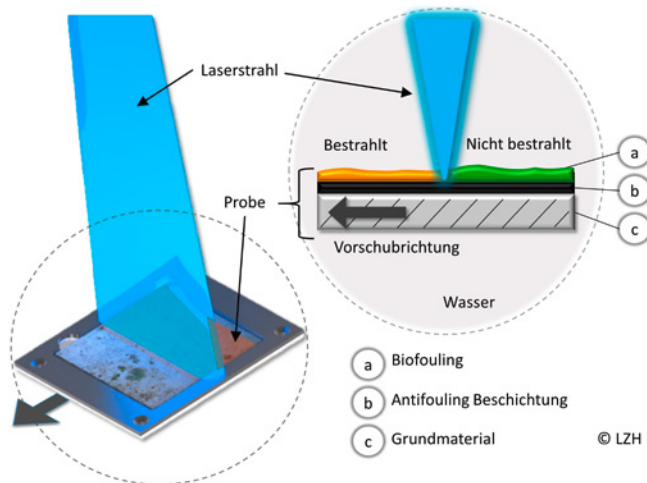


Abb. 1: Schematische Prozessillustration mit einer Schnittdarstellung durch die Probe und den unterschiedlichen Schichten.

2. AUFBAU DES DEMONSTRATORS UND VERSUCHSUMGEBUNG

Das zentrale Element für die Prozessentwicklung ist der Demonstrator, mit dem die eigentliche Bestrahlung der Proben durchgeführt wird, siehe Abbildung 3. Die jeweiligen Dioden-Laser sind eigenständige Module und befinden sich außerhalb des Demonstrators. Für die Probenbestrahlung wurden zwei Diodenlaser mit unterschiedlichen Wellenlängen bereitgestellt. Der eine Laser emittiert im infraroten Spektralbereich um 1000 nm und liefert optische Leistungen bis 3 kW. Der zweite Laser ist ein blauer Diodenlaser mit 450 nm mit 1,5 kW, siehe Abbildung 2. Dabei bietet der Einsatz eines Lasers im blauen Spektralbereich um 450 nm den Vorteil einer besonders geringen Absorption der Strahlung im Wasser, wodurch eine Bestrahlung unter Wasser über Distanzen von mehr als 20 mm möglich ist.

Der Laserstrahl wird mittels Lichtleitkabel zu den Laseroptiken im Demonstrator geleitet. Zur Bestrahlung der Proben formen Linienoptiken jeweils für die infrarote Strahlung und die blaue Strahlung linienförmige Foki mit variabler Linienbreite, um Parameterstudien mit unterschiedlichen Leistungsdichten im Fokus durchführen zu können. Die Linienbreite wird.



Abb. 2: Blauer Diodenlaser in kompaktem 19"-Gehäuse mit 1,5 kW optischer Leistung bei 450 nm.

dabei über die Anlagensteuerung vorgegeben und Motoren in der Optik stellen die Position der optischen Komponenten entsprechend ein. Die Laserstrahlquellen und die Laseroptiken müssen im Betrieb mit Kühlwasser versorgt werden, welches von einem Wasser-Luft-Kühler geliefert wird. Die Stromversorgung und Steuerungseinheit des Achssystems befinden sich ebenfalls in einem eigenständigen Modul, welches über Kabel mit den Achsen und dem Steuerungs-Computer verbunden ist.

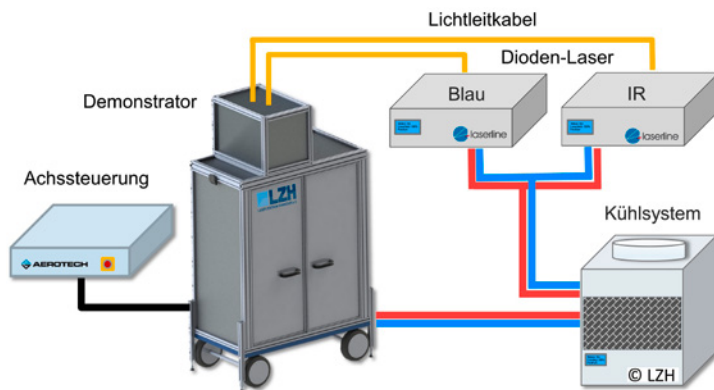


Abb. 3: Schematische Darstellung des Gesamtkonzepts mit den einzelnen Komponenten.

Der detaillierte Aufbau des Demonstrators ist in der Abbildung 4 dargestellt. Der Laserstrahl verläuft durch die Laseroptik in den Bearbeitungskopf und trifft anschließend auf die Probe, welche in der Probenhalterung fixiert ist und mithilfe des Achssystems verfahren werden kann. Es wird jeweils nur eine der beiden Laserstrahlquellen für die Bestrahlung der Proben verwendet, um die unterschiedlichen Wellenlängen miteinander zu vergleichen. Eine Sauerstoffanreicherung des Prozesswassers wird durch Belüftungssteine und eine dafür vorgesehene elektrische Pumpe sichergestellt. Für die Entleerung des Wasserbeckens und die Spülung des Bearbeitungskopfes wird eine Wasserpumpe verwendet. Um systematische Fehler in der Versuchsdurchführung zu vermeiden und die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse zu garantieren, wurde ein hoher Automatisierungsgrad realisiert. Hierfür werden nahezu alle elektrischen Bauteile über eine eigens programmierte Versuchssoftware angesteuert.

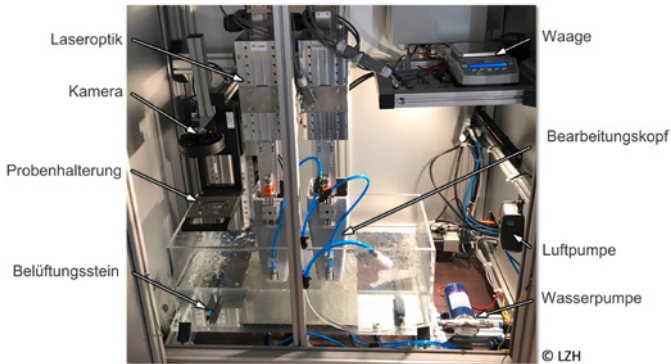


Abb. 4: Detaillierter Aufbau des Demonstrators.

Bei einer zukünftigen Anwendung soll das durch die Bestrahlung letal geschädigte Biofouling als Folge des Fahrtwiderstandes im Wasser abgesichert werden. Um die Fahrt eines Schiffs zu simulieren und die daraus resultierende Wasserströmung im Labormaßstab nachzustellen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Durchflusszelle konstruiert und aufgebaut. Als Blaupause für die Konzeptionierung diente die in der wissenschaftlichen Gemeinschaft häufig referenzierte Durchflusszelle von Schulz et al., 2000¹.

Die Durchflusszelle ermöglicht die gleichzeitige Untersuchung von drei Proben der Größe 76 × 26 mm, die in einer Probensektion (1x3 nebeneinander) passgenau angeordnet sind. Die Proben werden nebeneinander platziert, wobei ihre Längsachse mit der Strömung ausgerichtet ist. Über ein Vakuumansaugung werden die Proben während der Anströmung an Ort und Stelle fixiert. Die Strömung aus der Teststrecke tritt in ein Diffusorrohr, gefolgt von einem großvolumigen Abflussbehälter aus. Das Reservoir besitzt ein maximales Wasservolumen von 210L, was die Zeit für einen vollständigen Kreislaufdurchfluss des Gesamtprozesswassers verlängert. Dieser Umstand soll die Wärmeentwicklung im Meerwasser reduzieren. Zudem bietet ein Reservoir dieser Größe den Vorteil, dass sich die aus der Testsektion austretende Strömung absetzen kann, bevor sie rezirkuliert wird. Der Aufbau ist in der Abbildung 5 im Detail dargestellt.

Die Bewuchsproben werden auf einem Prüfstand für Bewuchstests ausgelagert, der sich auf einem Schwimmponton im Helgoländer Hafen befindet und nur mit dem Boot erreichbar ist, siehe Abbildung 6. Um ein Prozessverständnis zu erarbeiten und umfangreiche Parameterstudien durchzuführen, ist ein hoher Probendurchsatz notwendig. Aus diesem Grund werden maßgeblich kleine Proben mit den Maßen 72 mm × 26 mm verwendet. Zusätzlich werden vereinzelt Proben mit 100 mm × 100 mm aus Stahl betrachtet. Es werden fünf verschiedene Beschichtungssysteme, die konventionell in der Schifffahrt verwendet werden, untersucht. Zusätzlich werden nicht beschichtete Glasproben verwendet, um die Wechselwirkungen zwischen dem Biofouling und der Laserstrahlung isoliert untersuchen zu können.

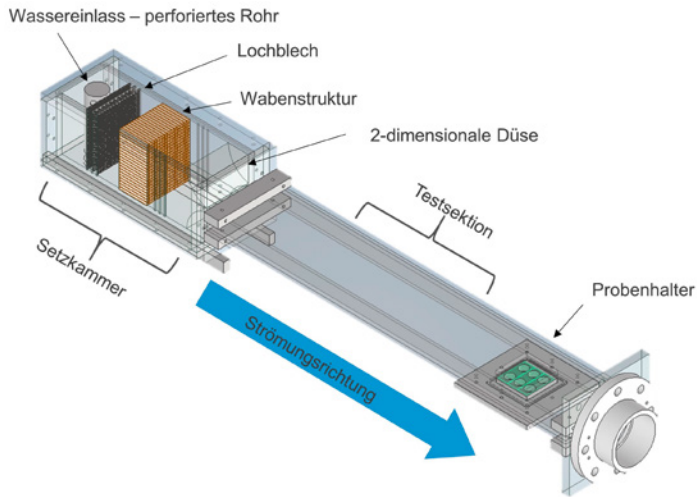


Abb.5: Aufbau der Durchflusszelle für die Simulation der Schiffsbewegung und der einhergehenden Wasserströmung unter Wasser.



Abb. 6: Links: "Moonpool" des Schwimmpontons mit den im Wasser hängenden Probenrahmen. Rechts: Bewachsene Proben nach einer Auslagerungsdauer von fünf Monaten.

3. DOKUMENTATIONSSCHEMA

Im Rahmen der Auswertung werden unterschiedliche Stadien und Zustände dokumentiert und miteinander verglichen. Eine schematische Übersicht des Dokumentationsablaufs ist in der Abb. 7 dargestellt. Der Zustand ① zeigt das Biofouling nach der Auslagerung in der Nordsee. Die Dauer dieser Auslagerung variiert, je nachdem welcher Bewuchsgrad untersucht werden soll. Nach der Bestrahlung der entnommenen Bewuchsproben wird der Zustand ② aufgenommen und die Beschaffenheit des Biofoulings direkt nach der Laserbestrahlung dokumentiert. Anschließend wird die bestrahlte Probe erneut ausgelagert und nach einem Intervall von zwei bis vier Wochen erneut entnommen. Dieser Zustand stellt den eigentlichen zeitversetzten Reinigungserfolg ③ dar. In einigen Versuchsreihen werden zusätzliche die Proben in der Durchflusszelle mit Wasser angeströmt, um die Fahrt mit dem Schiff und die daraus resultierende Wasserströmung zu simulieren.

Anschließend wird der finale Reinigungseffekt dokumentiert ④. In Auszügen werden einige der Ergebnisse, die auf Basis dieser Vorgehensweise durchgeführt wurden, vorgestellt.

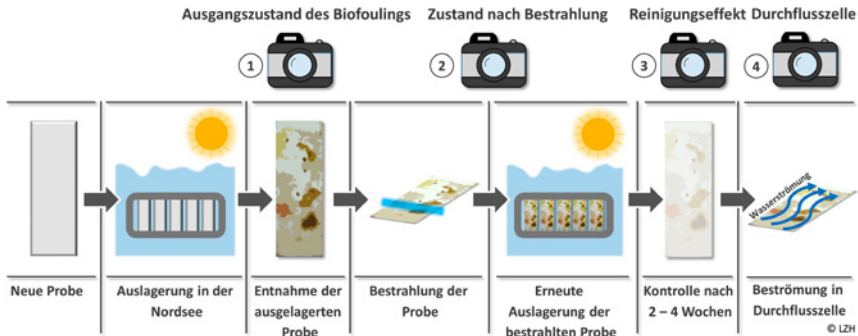


Abb. 7: Darstellung des Versuchsablaufs und der vier unterschiedlichen Dokumentationsstadien (umkreiste Zahlen).

4. BISHERIGE ERGEBNISSE

4.1. REINIGUNGSEFFEKT UNTER STATISCHEN AUSLAGERUNGSBEDINGUNGEN

Die Wirkung der Laserstrahlung auf das Biofouling veranschaulicht die Abbildung 8. Zunächst einmal kann ein direkter Einfluss auf den Bewuchs durch die Laserstrahlung festgestellt werden. Bei den Proben handelt es sich um Objektträger, welche mit einem Fouling-Release-Coating (FRC) beschichtet und für drei Monate in der Nordsee ausgelagert wurden. Nach der Bestrahlung mit blauer und infraroter Laserstrahlung zeigt das Biofouling eine deutliche Farbveränderung vom dunkelgrünen/bräunlichen Erscheinungsbild hin zu einer hellgrünen Farbe. Die Farbveränderung ist ein Indiz für eine Schädigung von photodestruktiven Pigmenten innerhalb der Zellen. Zudem können auch Unterschiede zwischen den Laserstrahlquellen festgestellt werden. Die Farbveränderung, welche durch die blaue Laserstrahlung induziert wird, ist im Vergleich mit der infraroten Laserstrahlung deutlich ausgeprägter. Neben der höheren Absorption der infraroten Strahlung durch das Wasser könnte ein weiterer Grund hierfür sein, dass einige der Pigmente in den Organismen vor allem Licht im blauen bis gelben Spektralbereich (Wellenlängenbereich: 490 nm bis 580 nm) absorbieren. Somit ist die blaue Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 450 nm deutlich effektiver und kann mehr Pigmente zerstören als die infrarote Laserstrahlung im Bereich von 1000 nm.

Nach der Bestrahlung und einer erneuten Auslagerung der Proben im Meerwasser wurden diese mit einer nicht bestrahlten Referenz-Probe über eine Dauer von vier Wochen verglichen. Die nicht bestrahlte Referenz-Probe zeigt über den beobachteten Zeitraum eine stetige Zunahme des Bewuchses. Die bestrahlten Proben hingegen weisen eine deutliche Verringerung des Biofoulings nach zwei Wochen auf. In dem darauffolgenden Zeitraum nimmt der Bewuchs wieder geringfügig zu. Die Ergebnisse zeigen, dass das Biofouling durch die Laserstrahlung letal geschädigt wird und sich auch unter statischen Auslagerungsbedingungen zurückbildet bzw. abfällt.

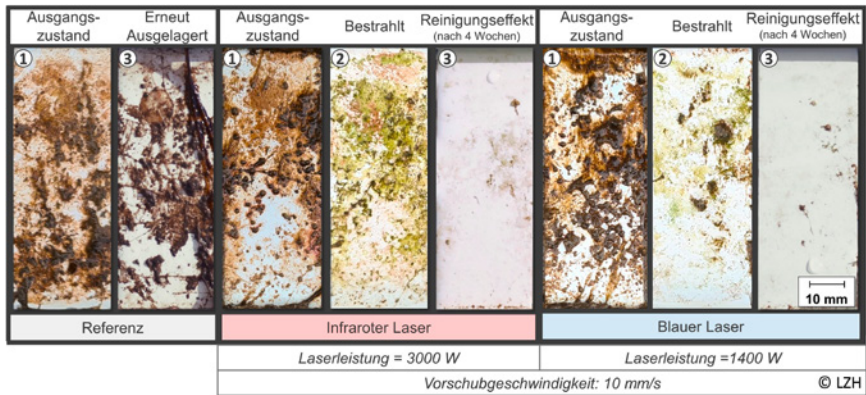


Abb. 8: Vergleich zwischen nicht bestrahlter (links) und bestrahlter Probe (rechts) über einen Zeitraum von 4 Wochen. Die umkreisten Nummern geben den Dokumentationszeitpunkt wieder, welcher in der Abb. 6 definiert wurde.

4.2. BEOBACHTUNG DER LETALEN SCHÄDIGUNG UND DES ABLÖSEVERHALTENS UNTER WASSER

Durch die Laserbestrahlung und letale Schädigung entsteht ein zeitlich versetzter Reinigungseffekt, welcher in einem Zeitfenster von zwei Wochen auftritt. Um die Veränderungen des Biofoulings unter Wasser nach der Bestrahlung mit dem Laser zu dokumentieren und das Ablöseverhalten zu beobachten, wurde ein autarkes Unterwasser-Kamerasystem (UKS) entwickelt. Hierdurch können die Proben in einem Zeitfenster von 2 Wochen unter Wasser beobachtet werden. Ein Auszug der Ergebnisse ist in unterschiedlichen Fotoserien in der Abbildung 9 dargestellt. Im Speziellen wird auf das Schadens- und Ablöseverhalten der Seepocken eingegangen. Über einen Zeitraum von 12 Tagen kann bei den bestrahlten Proben eine deutliche Abnahme des Biofoulings beobachtet werden. Dabei findet die größte Abnahme innerhalb der ersten 6 Tage statt. In den darauffolgenden Tagen ist immer noch ein Ablösen des Bewuchses zu beobachten, jedoch in einem geringeren Umfang. Die genaue Betrachtung der bestrahlten Seepocken zeigt, dass diese mit einer Schadensrate von 100% letal geschädigt werden. Hierdurch nimmt die Haftung ab, wodurch sich 65% der Seepocken innerhalb von 12 Tagen ablösen und der Rest abgestorben auf der Probenoberfläche verbleibt. Die nicht bestrahlten Seepocken auf den Referenzproben bleiben vollständig vital und wachsen über die Auslagerungsperiode stetig weiter. Die rot umkreisten Bereiche markieren die Stellen, an denen die bestrahlten Seepocken abgefallen sind. Der Ablösezeitpunkt ist in den entsprechenden Balkendiagrammen dargestellt. Hierbei kann allerdings kein eindeutiges Zeitintervall für den Ablösezeitpunkt abgeleitet werden. Auch die unbestrahlten Referenzproben weisen insbesondere in den ersten 6 Tagen eine Verringerung des Biofilms auf. Gründe hierfür können saisonale Schwankungen, veränderte Strömungsbedingungen oder auch eine Schädigung durch die Entnahme zwecks Dokumentation sein. Jedoch gilt die Abnahme einzig für den Biofilm, wohingegen der restliche Bewuchs weiterwächst und deutlich zunimmt. Bei den bestrahlten Proben kann beobachtet werden, dass nach der Verringerung des Bewuchses, parallel dazu ab dem Tag 8, eine neue Besiedlung der Probenoberfläche mit einem Biofilm stattfindet.

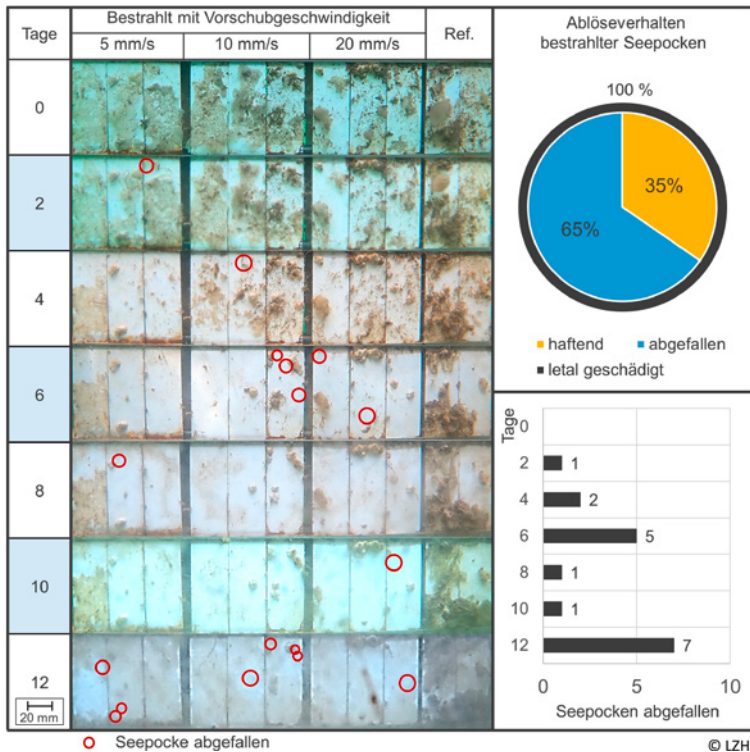


Abb. 9: Fotoserie des Unterwasser-Kamerasystems einer FRC-Beschichtung über einen Zeitraum von 12 Tagen. Rot umkreist sind die Positionen abgefallener Seepocken, bestrahlt mit blauem Laser bei 1400 W. Auf der rechten Seite ist der Anteil der abgefallenen Seepocken in einem Kreisdiagramm dargestellt und darunter der Ablösezeitpunkt in einem Balkendiagramm.

4.3. REINIGUNGSEFFEKT UNTER DYNAMISCHEN VERHÄLTNISSEN DURCH WASSERSTRÖMUNG IN EINER DURCHFLUSSZELLE

Im Fokus der folgenden Versuchsreihen steht neben dem Reinigungseffekt unter statischen Auslagerungsbedingungen insbesondere der Einfluss durch eine Wasserströmung in der Durchflusszelle. Hierdurch kann in Ansätzen eine dynamische Auslagerung des letal geschädigten Biofoulings simuliert werden. Des Weiteren wurden für diese Versuchsreihen vornehmlich Proben mit Hard-Fouling in Form von Seepocken bestrahlt (siehe Abb. 9). Bei der Beschichtung handelt es sich um eine Hart-Beschichtung. Das Zwischenergebnis mit dem zeitversetzten Reinigungseffekt unter statischen Bedingungen ③ ist bereits sehr eindeutig. Durch die Bestrahlung werden das Soft-Fouling sowie das Hard-Fouling effektiv letal geschädigt. In den vorliegenden Proben sind für beide Vorschubgeschwindigkeiten alle Seepocken letal geschädigt und ein Großteil des Soft-Foulings ist abgestorben. Des Weiteren verliert das Biofouling im Allgemeinen die Haftungseigenschaften, so dass dieses selbst unter statischen Auslagerungsbedingungen abfällt.

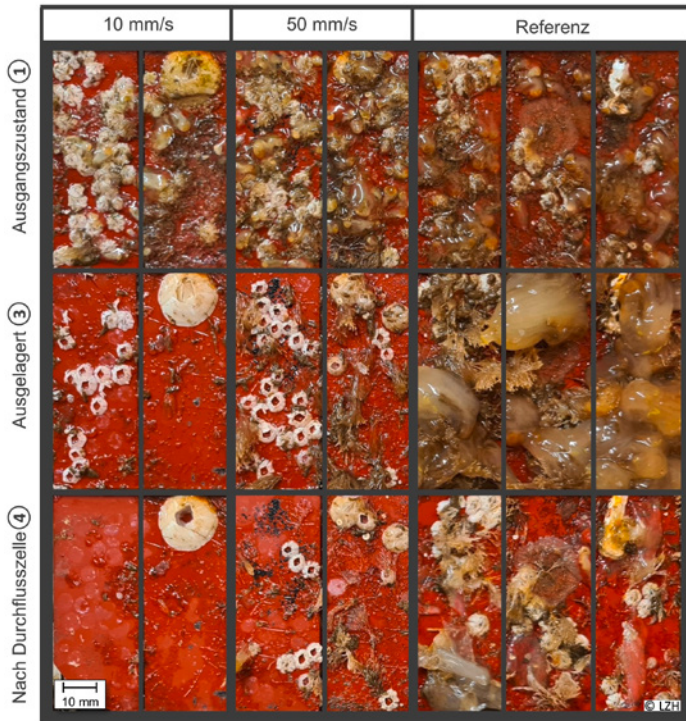


Abb. 10: Ergebnisse der Bestrahlung mit anschließender erneuter Auslagerung und Anströmung in der Durchflusszelle. Vergleich unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeiten bei einer Laserleistung von 1400 W und einer Wellenlänge von 448 nm (blau). Die umkreisten Nummern geben den Dokumentationszeitpunkt wieder, welcher in der Abb. 6 definiert wurde.

Eindeutiger wird das Bild, in dem die Proben in der Durchflusszelle für eine Dauer von zwei Minuten mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 5,1 m/s (9,9 kn) mit Wasser angeströmt werden (Zustand ④). Diese Initialströmung reicht aus, um weitere Seepocken und Soft-Fouling abzuspielen. Vor allem im Vergleich zu den Referenzproben wird die Effektivität der Bestrahlung deutlich. So haften bei allen drei Referenzproben alle Seepocken nach den Versuchen in der Durchflusszelle weiterhin an der Oberfläche. Bei den bestrahlten Proben hingegen zeigt sich, dass ein Großteil und bei einer Probe sogar alle Seepocken entfernt werden konnten.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die bisherigen Ergebnisse des Forschungsprojekts »Foullas« sind vielversprechend. Der Einfluss auf das Biofouling durch die Laserbestrahlung kann auf makroskopischer Ebene durch eine deutliche Farbveränderung des Soft-Foulings beobachtet werden. Durch die Auslagerung der bestrahlten Bewuchsproben und einen Vergleich mit nicht bestrahlten Referenz-Proben konnte nachgewiesen werden, dass das Biofouling durch die Laserstrahlung letal geschädigt wird und sich auch unter statischen Auslagerungsbedingungen zurückbildet und partiell abfällt. Dies gilt sowohl für Soft-Fouling als auch

für Hard-Fouling in Form von Seepocken. In einer zukünftigen Anwendung setzt der eigentlich zeitversetzte Reinigungseffekt jedoch während der Fahrt des Schiffes ein, welches durch einen zusätzlichen Versuch mit der Durchflusszelle im Labormaßstab abgebildet werden konnte. Dieser dynamische Reinigungsfall zeigt ebenfalls, dass die Haftungseigenschaften des letal geschädigten Biofoulings stark geschwächt werden und das Reinigungsergebnis sogar deutlich zunimmt.

Das Forschungsprojekt »FoulLas« endet mit dem Jahreswechsel Ende 2022 und die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen einen Ausschnitt von den zahlreichen Erkenntnissen, die gewonnen werden konnten. Ein weiterer Fokus liegt neben der Prozessoptimierung durch Parameterstudien auf einer ausführlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Vor allem der Vergleich der möglichen Kosten eines Laserreinigungssystems in Relation zu marktüblichen Verfahren gepaart mit der maximal erreichbaren Flächenleistung pro Stunde ist von besonderem Interesse in den gegenwärtigen Überlegungen.

HYDESIGN –

HYBRIDE SIMULATIONSVERFAHREN IM ENTWURFSPROZESS
VON ENERGY SAVING DEVICES UND PROPELLERN

AUTOREN

LUTZ KLEINSORGE	MECKLENBURGER METALLGUß GMBH
PASCAL ANSCHAU	SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT POTSDAM
STEVE LEONARD	IBMV MARITIME INNOVATIONSGESELLSCHAFT MBH
SINA SAMARBAKHSH	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FÜR MODELLIERUNG UND SIMULATION
NIKOLAI KORNEV	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FÜR MODELLIERUNG UND SIMULATION
ERIC EBERT	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FÜR OPTOELEKTRONIK UND PHOTONISCHE SYSTEME
NILS DAMASCHKE	UNIVERSITÄT ROSTOCK, LEHRSTUHL FÜR OPTOELEKTRONIK UND PHOTONISCHE SYSTEME

1. EINLEITUNG

Lieferanten für Schiffsantriebe müssen ihre Produkte präzise und zuverlässig entwerfen. Größere Entwurfspräzision ermöglicht geringere Sicherheitsmargen, damit weniger Materialeinsatz und günstigere Fertigungsverfahren. Dies stellt die verwendeten Methoden immer wieder vor neue Herausforderungen. Letztendlich werden die Produkte kostengünstiger, wettbewerbsfähiger und ressourcenschonender. Für den Entwurf von Schiffsantrieben ist mittlerweile das numerische RANSE-Verfahren zur Strömungssimulation etabliert. Dieses Verfahren liefert für integrale Größen wie Widerstand, Schub und Drehmoment häufig hinreichend genaue Ergebnisse. Bei der Betrachtung von wirbelartigen Strukturen sind diese jedoch tendenziell ungenau. Dies trifft insbesondere auf Ablösebereiche der Strömung und Nachstromfelder zu, welche nach heutigem Stand der Technik nur sehr ungenau experimentell oder numerisch vorhergesagt werden können. Diese instationären Effekte führen zu Vibration und erhöhten Belastungen an Lagern der Propellerwelle, sowie der strukturellen Anbindung der ESDs an das Schiff/den Propellern. Im ungünstigsten Fall führt dies zum Versagen von Bauteilen.

In dem Vorhaben HyDesign sind hybride Methoden der Strömungssimulation und experimentelle Messverfahren weiterentwickelt worden um wirbelbehaftete Strukturen in der Strömung zeitaufgelöst abbilden zu können. Unter hybrider Strömungssimulation wird eine Kopplung von LES und RANSE-Verfahren verstanden. Die aus den Verfahren resultierenden zeitabhängigen Kräfte und Lasten auf das Bauteil werden zukünftig genutzt um diese Produkte konstruktiv und hydrodynamisch zu verbessern.

Für die Validierung ist als Versuchsträger die Schiffsform eines Handysize Massengutschiffes ausgewählt worden. Die völlige Hinterschiffsform führt zu einem stark inhomogenen Nachstrom. Für das Schiff sind nach herkömmlichen Methoden durch die Partner Mecklenburger Metallguss (MMG) und IBMV maritime Innovationsgesellschaft (IBMV) Propeller und Vordralldüse ausgelegt und in mehreren Entwurfsiterationen aufeinander abgestimmt worden. Die Hinterschiffsgeometrie ist zusätzlich am Stevenrohr und in der Gillung angepasst worden, so dass die Anforderungen an alle Messsysteme erfüllt werden. Zur Validierung der CFD-Methoden sind PIV-Messungen der Schwankungen der Strömung zwischen Düse und Propeller, Messungen des instationären Druckes an der Düsengeometrie, sowie der instationären Kräfte und Momente an der Düse und am Propeller durchgeführt worden. In Tab. 1 sind die Hauptabmessungen dargestellt. Abb. 2 links zeigt die Anordnung der Propulsionsorgane des Schiffes für den Modellversuch.

Tab. 1: Hauptdaten des Versuchsträgers für die experimentellen und numerischen Untersuchungen

Schiff:		
Länge zwischen den Loten	l_{pp}	180,00 m
Breite	B	30,00 m
Design Tiefgang	T	10,50 m
Verdrängung	V	46152,00 m ³
Blockkoeffizient	c_b	0,79
Propeller:		
Durchmesser	D	6,30 m
Flügelzahl	Z	4
Flächenverhältnis	A_E/A_0	0,4
Maßstabsfaktor	λ	30

2. NUMERISCHE & EXPERIMENTELLE ENTWICKLUNGEN

2.1 Entwicklung Hybrider Modelle zur Strömungssimulation

Der Partner Universität Rostock, Lehrstuhl für Modellierung und Simulation (LeMoS) beschäftigte sich mit der Weiterentwicklung der numerischen Methoden zur Simulation der Schiffspropulsion. Hierbei wurde maßgeblich die Entwicklung des hybriden Turbulenzansatzes nach [1] vorangetrieben, damit dieser verlässlich für die Bestimmung instationärer Kräfte und Momente genutzt werden kann. In dem von LeMoS erarbeiteten Verfahren, wird das Rechengebiet dynamisch in LES und RANS-Zonen aufgeteilt. Als Kriterium dient hierfür das Verhältnis aus der Integrallänge L und der Zellabmessung. Damit sichergestellt wird, dass LES Zonen nicht nah am Rumpf entstehen und es dort zu ablösenden Wirbelstrukturen auf Grund des Rechengitters kommt, ist eine Abschirmbedingung in das Modell eingeflossen. Diese ist Analog formuliert, wie im Übergang von DES zu DDES. Eine detaillierte Ausführung zu dem Shielding-LeMoS-Hybrid Model (SLH-Model) genannten Verfahren kann [2] entnommen werden.

Fortlaufend während der Weiterentwicklung des SLH-Modells sind systematische CFD-Simulationen mit unterschiedlicher Netzfeinheit durchgeführt worden. Ziel hierbei war es eine optimale Netzfeinheit herauszufinden, so dass bei späteren Anwendungsfällen Ressourcen und Zeit gespart werden können. Auch ist hierbei überprüft worden, wie sich unterschiedliche Turbulenzmodelle auf die Bestimmung der integrativen Kräfte auswirken. So konnte gezeigt werden, dass das SLH-Modell dazu neigt, Reibungskräfte zu gering vorherzusagen, da für dieses Modell Netzfeinheit und die Auflösung der prismatischen Grenzschicht wesentlich feiner sein muss. Dies ist jedoch für die Modellierung der Wirbelstrukturen in der Strömung nicht notwendig. Abb. 1 zeigt die in der Simulation entstehenden Wirbelstrukturen im Vergleich. Es ist klar zu erkennen, dass das SLH-Modell die Strukturen der Wirbel am Versuchsträger wesentlich besser auflöst.

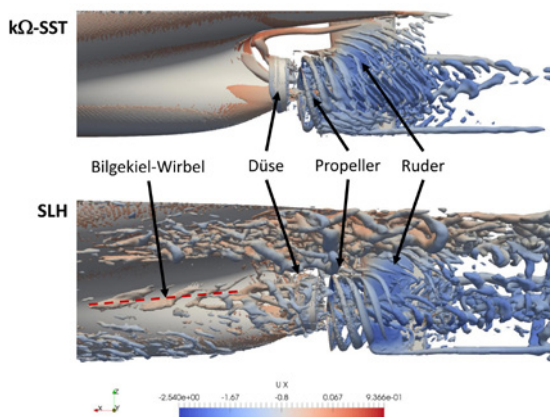


Abb. 1: Visualisierte Wirbelstrukturen im Hinterschiffsbereich des Versuchsträgers aus der Propulsionssimulation (Q -Kriterium = 100). Oben: Simulation mit $k\text{-}\Omega\text{-SST}$ -Modell. Unten: Simulation mit dem SLH-Modell

2.2 Entwicklung von Messtechnik

Bei den Partnern Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA) und Universität Rostock, Lehrstuhl für Optoelektronik und Photonische Systeme (OPS) sind die experimentellen Messgeräte zur Messung der Strömung, Kräfte und Momente, sowie der Drücke auf der Oberfläche entwickelt worden.

Der Schwerpunkt der SVA liegt in der Messung der Düsenkräfte und -momente und der Drücke an verschiedenen Orten am Düsenprofil. Hierzu ist eine Kraftwaage in das Hinterschiff des Modells integriert worden, an der Pre-Swirl Organe angebracht werden können. Die Düse wurde durch moderne 3D-Druck Techniken als Hohlkörper erstellt, sodass Zuleitungen zur Messung von Drücken an acht Orten integriert werden können. Die Herausforderung besteht bei diesem Messkonzept darin, die Düsenkräfte zu messen, ohne dass diese durch die Zuleitungen, bzw. die Propellerwelle beeinträchtigt werden. Abb. 2(links) zeigt die Anordnung der Messkomponenten vor dem Versuch, die Abb. in der Mitte zeigt die Aufnahme der Kraftmesswaage für die Düse, die Abb. rechts zeigt die Durchführung der Zuleitungen für die Druckmessungen.



Abb. 2: Links: Anordnung der Propulsionsorgane am Versuchsträger. Mitte: Aufnahme der Kraftmesswaage für die Düse. Rechts: Düse mit Druckmesspunkten

Frühere Versuche, die an der Düse wirkenden Kräfte zu messen, wurden konzeptionell so durchgeführt, dass die Düse an einer relativ langen Trägerstange befestigt war, die als Anbindung an das Messglied diente. Das Messglied war dabei im Rumpf oberhalb der Wasserlinie untergebracht. Durch diese Anordnung war das ganze System so weich, dass eine zuverlässige Messung der Düsenkräfte nur sehr eingeschränkt möglich war. Die im Projekt HyDesign verfolgte Lösung des Problems ergibt mit der obigen Konstruktion einen minimalen Hebelarm von Düse zur Kraftmesswaage. Die Düse wird an ihrem Mittelrohr praktisch nicht elastisch verformt, und alle Kräfte werden auf kürzestem Weg in den Sensor eingeleitet. Eigenschwingungen der Düsenkonstruktion werden somit auf ein Minimum reduziert bzw. in einen Frequenzbereich verlagert, der jenseits der Abtastfrequenzen liegt.

Die zunächst aus Kunststoff gefertigte Düse wurde in einer weiteren Messkampagne durch eine Düse aus Aluminium (ebenfalls per 3D-Druck gefertigt) ersetzt, da sich bei der Kunststoffdüse die Weichheit des Materials in störenden Eigenschwingungen ausgewirkt hatte. Diese entstehen vor allem an den sehr dünn profilierten Struts der Düse. Das Diagramm in Abb. 3 zeigt das Spektrum der Eigenschwingungen und den erheblichen Einfluss der Materialeigenschaften auf das Schwingungsverhalten. Die Entscheidung zur Fertigung der Metaldüse war also sinnvoll, wie sich auch in der Analyse der gemessenen Düsenkräfte zeigt.

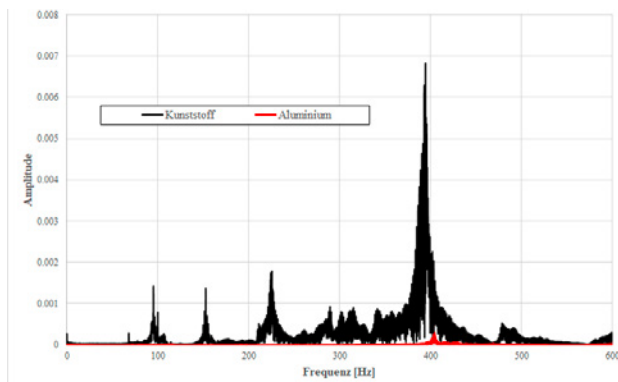


Abb. 3: Eigenfrequenzen der Düse aus Aluminium (rot) und Kunststoff (schwarz)

Die Diagramme in Abb. 4 veranschaulichen die Auswirkung der höheren Steifigkeit der Aluminiumdüse auf die Kraftmesswerte im Vergleich zur Kunststoffdüse. Während sich in der oberen Reihe (Modell mit Düse, ohne Propeller) nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Düsen zeigen, reagiert die Kunststoffdüse in den y- und z-Komponenten mit erheblich größeren Ausschlägen als die Aluminiumdüse. Die Verformung der Düse unter dem Einfluss des Propellers geht offenbar so weit, dass sich die Krafrichtungen aufgrund veränderter Anströmbedingungen teilweise umkehren. Dass die Ausschläge der x-Komponente in etwa gleich groß sind, wird damit zusammenhängen, dass die Verformbarkeit in x-Richtung aufgrund der Struktur der Düse sowieso am geringsten ist.

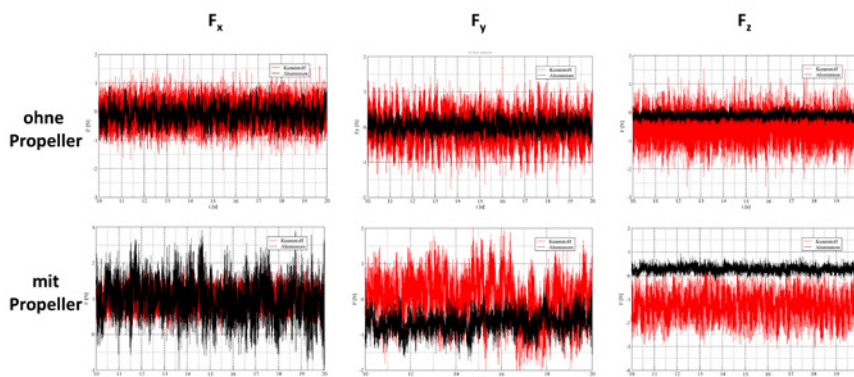


Abb. 4: Vergleich der Düsenkräfte mit bzw. ohne Propeller, Kunststoff- (rot) und Aluminiumdüse (schwarz).

OPS zeichnete sich für die Messung der Fluktuationen in der Strömung verantwortlich. Diese werden über ein neuentwickeltes PIV-Messsystem ermittelt, bei der Kamera und Laser im Schiffsrumpf installiert sind und durch eine Plexiglasscheibe in die Strömung blicken. Über eine verfahrbare Traverse kann der Laserschnitt beliebig in Schiffsquerrichtung verfahren werden. Es können so die Geschwindigkeiten in der Strömung in einer Messebene bestimmt werden. Die Ebene kann in Schiffsängsrichtung frei positioniert werden. Das System ist platzsparend und einfach zu installieren. Damit während der Propulsionsversuche genügend Partikel aufgenommen werden können, sind zusätzlich Gerätschaften zum gleichmäßigen sähen der Partikel vor dem Versuchsträger angebracht worden. Um die großen Datenmengen, welche beim PIV entstehen, besser weiterverarbeiten zu können, sind spezielle Analyse- und Aufbereitungsalgorithmen entwickelt worden. Diese konnten bereits während der Messung genutzt werden, um die Messqualität abzuschätzen. Dies ermöglichte es gegebenenfalls Versuche zügig zu wiederholen. Abb. 5 zeigt das beim Partner OPS entwickelte Messsystem installiert auf dem Versuchsträger.

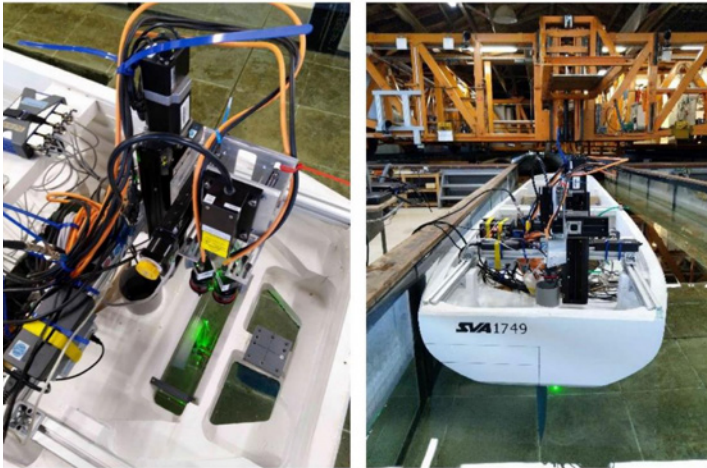


Abb. 5: Entwickeltes PIV Messsystem zur hochaufgelösten Geschwindigkeitsmessung

3. ERGEBNISSE UND VERWERTUNG

Die numerischen und experimentellen Verfahren sind im Vorhaben zur Validierung durch alle beteiligten Projektpartner genutzt worden. Regelmäßige Projekttreffen der Partner förderten den Erfahrungsaustausch und sorgen dafür, dass die Entwicklungen stetig überprüft und am Versuchsträger angewendet wurden.

3.1 Propeller

Zunächst sind vergleichende CFD-Simulationen zur Propulsion durch die MMG durchgeführt worden. Ziel war es hierbei zu überprüfen, inwieweit sich die Methoden eignen um den Selbstpropulsionspunkt des Validierungsfalls zuverlässig vorherzusagen. Dies fand im Vorlauf zu den Versuchen statt, so dass keine Anpassungen aufgrund von Versuchsergebnissen stattgefunden haben. Es sind Simulationen zur Ermittlung des Schiffswiderstandes, der Propellerfreifahrt und der Propulsion (Unterlast- und Überlastversuche) durchgeführt worden. Es zeigte sich, dass mit dem $k-\Omega$ -SST-Turbulenzmodell der Betriebspunkt des Schiffes (Drehzahl/Geschwindigkeit) gut getroffen wurde. Allerdings sind im Vergleich zum Modellversuch geringere Kräfte am Modell und Propeller ermittelt worden. Für die SLH-Methode ergaben sich gegensätzlich hierzu am Schiffmodell zu geringe Widerstandskräfte, wobei der Schub des Propellers gut vorhergesagt wurde. Hierdurch wird der Betriebspunkt des Schiffes nicht gut vorhergesagt. Die Ergebnisse für beide Methoden sind in Abb. 6 dargestellt. Die Herausforderung einer guten Bestimmung des Widerstandes am Schiffmodell resultiert aus einem zu niedrig berechneten Reibungsanteil am Schiffsrumpf und wurde vom Partner LeMoS im Vorhaben weitergehend untersucht.

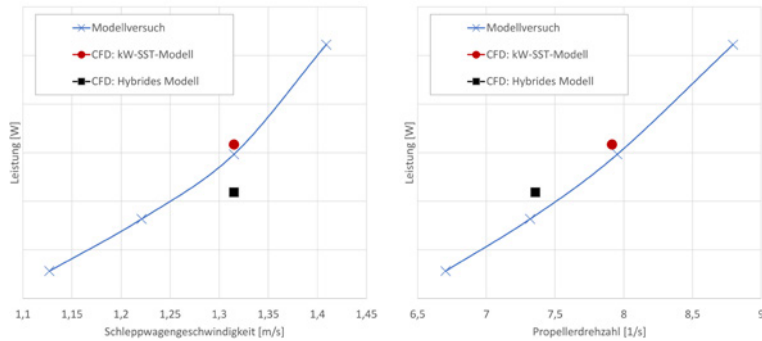


Abb. 6: Selbstpropulsionspunkt mit verschiedenen Turbulenzmodellen im Vergleich zu den Ergebnissen des Propulsionsversuches.

Die Fluktuationen in der Strömung verursachen eine instationäre Änderung der Flügelbelastung. Diese muss bei der Auslegung der Flügelfestigkeit berücksichtigt werden. Im Rahmen des Vorhabens ist daher bei dem Partner MMG eine einseitige Kopplung zwischen CFD und FEM entwickelt worden, mit dem der hydrodynamische Einfluss auf die Flügelfestigkeit überprüft werden kann. Hierzu wird das hydrodynamische Druckfeld in Abhängigkeit der Flügelposition als Randbedingung in das FEM-Modell übertragen. Die Grundlage hierfür bilden CFD-Simulationen im Selbstpropulsionspunkt der Großausführung. Es zeigte sich, dass durch die Anwendung des SLH-Modells sich die Schwankungen der Propellerkräfte im Vergleich zu herkömmlichen Zweigleichungsturbulenzmodellen erhöhen, was bei der Festigkeitsauslegung berücksichtigt werden muss.

3.2 Düse

Die bei CFD-Simulationen ermittelten Kräfte, Momente, sowie der Drücke an der Düse sind ebenfalls mit den Modellversuchsergebnissen verglichen worden. Hierbei wurden durch den Partner IBMV verschiedene Turbulenzmodelle mit dem entwickelten SLH-Modell verglichen. Dies wurde zunächst an einem Flügelprofil überprüft, wobei insbesondere erarbeitet wurde welche zeitliche und räumliche Auflösung nötig ist um mit Hilfe der URANS, Wirbelstraßen an der Hinterkante auflösen zu können. Es zeigt sich, dass dies bei dem genutzten $k-\Omega$ SST und Reynolds Stress Transport-Modellen mit hohem Aufwand verbunden war. Die Nutzung des SLH-Modells zeigt an diesen Strukturen bei wesentlich größerer Diskretisierung ähnliche Wirbelstrukturen.

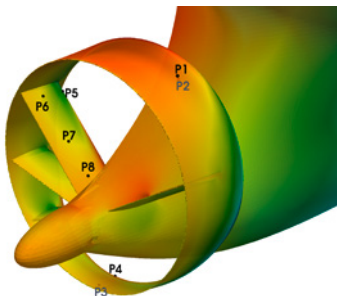


Abb. 7: Druckmesspunkte auf der Düse für Vergleich zwischen CFD und Experiment.

Zusätzlich sind die Messungen an der Düse mit den CFD-Simulationen verglichen worden. Abb. 7 zeigt den Ort der Druckaufnahme an der Düse. Abb. 8 zeigt den Vergleich des Zeitsignals zwischen der Messung, dem SLH-Modell und einer herkömmlichen URANS-Simulation mit $k-\Omega$ -SST Modell. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und SLH-Modell. Die URANS-Simulation prognostizieren den Mittelwert des Druckes ebenfalls gut, zeigen jedoch eine periodische Schwankung um einen Mittelwert. Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass beiden Rechnungen eine gleiche zeitliche und räumliche Diskretisierung zu Grunde liegt, zeigt das SLH-Modell eine realistischere Druckfluktuation. Tab. 2 zeigt die Auswertung aller acht Druckmesspunkte an der Düse im Vergleich für die Simulation mit der SLH-Methode ohne den Propeller. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation.

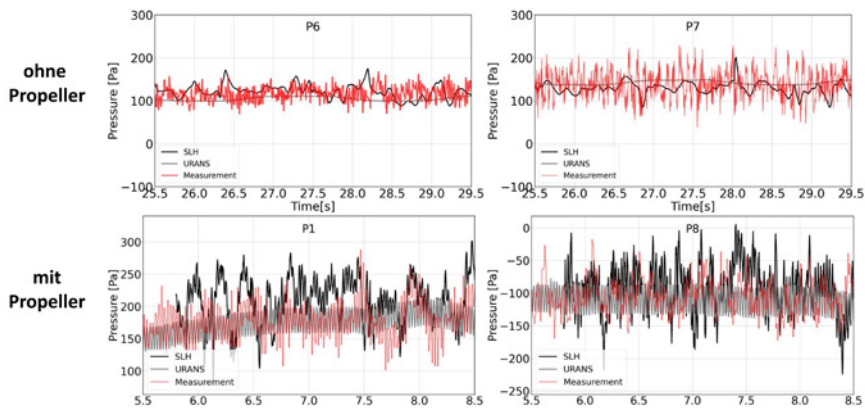


Abb. 8: Vergleich des Zeitsignals des Druckes an vier Position der Düse: rot – Messung der SVA, grau – URANS Berechnung, schwarz – SLH-Modell

Tab. 2: Ergebnisse der Druckauswertung an der Düse bei CFD-Simulation ohne Propeller

Druckmessort	Gemittelter Wert \bar{p} [Pa]		Schwankung $\sqrt{\langle p - \bar{p} \rangle^2}$ [Pa]	
	CFD (SLH)	Exp.	CFD (SLH)	Exp.
1	193	147	19,2	18,8
2	74	90	26,5	20,5
3	112	84	32,2	23,5
4	169	121	41,0	31,7
5	77	82	75,5	32,6
6	122	112	15,9	19,3
7	129	101	14,4	14,0
8	153	140	15,3	14,8

ZUSAMMENFASSUNG

In dem Vorhaben sind moderne hybride CFD-Methoden zur Simulation der Schiffsumströmung weiterentwickelt und angewendet worden. Zur Validierung der CFD-Methoden sind umfangreiche Modellversuche mit einem Massengutschiffsentwurf und einem Propulsionssystem bestehend aus Vordralldüse und Propeller durchgeführt worden. Für die Versuche sind Messsysteme zur Bestimmung der instationären Kräfte an Propeller und Düse, der Messung von instationären Drücken an der Düse, sowie von Geschwindigkeitsfeldern zwischen Düse und Propeller entwickelt worden.

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem entwickelten SLH-Modell instationäre Lasten an der Düse und am Propeller gut wiedergegeben werden können. Das hydrodynamisch angeregte Schwingungsverhalten der Düse und des Propellers lässt sich damit ermitteln. Die in dem Vorhaben entwickelten Methoden ermöglichen es weiterführende Prozesse bei den Industriepartnern zu entwickeln, sodass Fragestellung zum Schwingungsverhalten, Lastschwankungen, etc. die im Wesentlichen aus der Instationarität der Strömung resultieren, besser im Entwurf bewertet werden können. In der Zukunft muss noch überprüft werden, inwieweit die Methoden auch für die Großausführung validiert werden können. Im laufenden Vorhaben ist dies nur anhand von Modellversuchen geschehen. Für die Industriepartner ist weiterhin sehr interessant, die instationären Lasten auf Komponenten bei Drift, Manövern oder unter Berücksichtigung von Seegang zu untersuchen. Damit ergibt sich ein wesentlich genaueres Bild für die Ursache und Vermeidung von ungewünschten Belastungen und Vibrationen.

LITERATUR

- [1] Kornev, N., Taranov, A., Shchukin, E., Kleinsorge, L., 2011. Development of hybrid URANS-LES methods for flow simulation in the ship stern area. *Ocean Engineering* 38, 1831–1838.
- [2] Shevchuk, I., Kornev, N., 2018. Improved version of Lemos hybrid model for ambiguous grid densities. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 10, 270–281.

ENVISIM4MARE –

REALISIERUNG EXPERIMENTELLER UNTERSUCHUNGEN VON LEBENDEM MARINEM BEWUCHS AN OFFSHORE-WINDENERGIEANLAGEN DURCH DIE ERRICHTUNG DES SALZWASSER-WELLEN-STRÖMUNGSKANALS

AUTOREN

PROF. DR.-ING. HABIL. NILS GOSEBERG	TU BRAUNSCHWEIG
DR.-ING. DAVID SCHÜRENKAMP	TU BRAUNSCHWEIG
DR.-ING. CONSTANTIN SCHWEIGER	TU BRAUNSCHWEIG
CLEMENS KRAUTWALD, M.SC.	TU BRAUNSCHWEIG
PROF. DR. BELA H. BUCK	ALFRED-WEGENER-INSTITUT
DR. WOLF ISBERT	ALFRED-WEGENER-INSTITUT
CONSTANTIN LINDEMANN, M.SC.	ALFRED-WEGENER-INSTITUT, TU BRAUNSCHWEIG
DIPL.-ING. ALBRECHT VICTOR	JÖRSS-BLUNCK-ORDEMANN GMBH
DIPL.-ING. SEBASTIAN KELMA	JÖRSS-BLUNCK-ORDEMANN GMBH
ALEXANDER LOWAG	OCEAN BREEZE ENERGY GMBH & CO. KG

MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Der Klimawandel und die fortschreitende Energieproblematik erzeugen einen zusätzlichen Bedarf an erneuerbaren Energien. Unter den erneuerbaren Energien in Deutschland besitzt die Offshore-Windenergie ein enormes Potenzial und soll von 7,75 GW in 2020 auf 40GW bis 2040 ausgebaut werden (Musial et al. 2021). Die Offshore-Windenergie bedient zudem teils auch die Grundlast infolge hoher Volllaststundenzahl und weist somit einen Vorteil gegenüber anderen erneuerbaren Energien mit fluktuierender Energiebereitstellung auf. Der Markt an erneuerbaren Energien wächst stetig, wobei Deutschland gemeinsam mit Großbritannien und China weiterhin eine Vorreiterrolle einnimmt (Lee und Zhao 2022).

Neben den Neuinstallationen rücken zunehmend auch die endende Lebenszeit bestehender Offshore-Windenergieanlagen in den Fokus der Betreiber sowie der wissenschaftlichen Gemeinschaft (Ziegler und Muskulus 2016a, 2016b; Schoefs et al. 2005; Santos et al. 2022). Sobald eine Windenergieanlage die technische Lebensdauer erreicht, werden die Restkapazitäten der Tragstrukturen überprüft und neu bewertet, damit ein optimales End-Of-Life-Szenario und eine mögliche Laufzeitverlängerung beschlossen werden kann. Hierbei werden neben den applizierten Lasten auch das Auftreten von Rissen, Korrosion und das Vorhandensein von marinem Bewuchs berücksichtigt.

Sobald eine Offshore-Struktur installiert wurde, siedelt sich unmittelbar ein Biofilm und anschließend darauf der marine Bewuchs an. Die Auswirkungen von marinem Bewuchs sind vielseitig und nicht abschließend erforscht. Mariner Bewuchs wirkt sich nicht nur auf die dynamische Belastung und das Schwingungsverhalten aus, indem die Geometrie, Massenverteilung und Eigenfrequenz der Struktur verändert werden (Arcigni et al. 2021; Martinez-Luengo et al. 2017), sondern auch auf die Hydrodynamik und die hydrodynamischen Lastkoeffizienten, indem die Umströmung und Verwirbelungen infolge der steigenden relativen Rauheit modifiziert werden (Nedrebø 2014; Resvanis et al. 2014).

In wissenschaftlichen Studien werden die Effekte von marinem Bewuchs zumeist einzeln untersucht und deren Einfluss quantifiziert. Hierfür wird bspw. die Geometrie des marinen Bewuchses parametrisiert und anhand von Ersatzmodellen nachgebildet (Landmann et al. 2019), da echter mariner Bewuchs in den bestehenden Versuchseinrichtungen bislang nicht (stressfrei) gehalten werden kann. Diese Modellbildung hat zur Folge, dass die vielschichtigen Wirkzusammenhänge der Biomechanik von marinem Bewuchs (Denny und Gaylord 2010) idealisiert, nicht in ihrer Gesamtheit untersucht und durch Modelleffekte überlagert werden können.

Bislang fehlen innovative Methoden zur wissenschaftlichen Begleitung und Optimierung von durch marinen Bewuchs beeinflussten Belastungen an Offshore-Windenergieanlagen. Daraus entsteht ein Bedarf an hydraulischen Untersuchungen von lebendem marinem Bewuchs in experimentellen Einrichtungen mit dem Ziel, neue Kenntnisse zu den offenen Fragestellungen für Wissenschaft und Industrie zu erarbeiten. Insbesondere fehlt es bislang an Möglichkeiten, lebenden marinen Bewuchs längerfristig zu halten, um den Einfluss auf Strukturen unter nahezu natürlichen Bedingungen (u.a. Salzgehalt, Temperatur, pH-Wert) zu untersuchen. Zudem wurde die Rauheitswirkung von marinem Bewuchs bislang zumeist in unidirektionaler Strömung (Resvanis et al. 2014; Theophanatos und Wolfram 1989; van Paul Hinsberg 2021; Zhou et al. 2015) oder in wenigen Fällen auch bei oszillierenden Wellen (Sarpkaya 1990; Tian et al. 2020; Vested et al. 2020; Wolfram und Naghipour 1999) mit einfachen Ersatzmodellen untersucht. Beide Lastfälle treten in der Natur allerdings kombiniert auf, was nur in wenigen Versuchseinrichtungen technisch umgesetzt werden kann. Ferner sind den Autoren keine großmaßstäblichen Einrichtungen bekannt, in denen zusätzlich zur Wellen-Strömungs-Interaktion auch natürliche Bedingungen sowohl während als auch zwischen mehreren Versuchsdurchläufen (Hälterung) geschaffen werden können, die für das Überleben von marinen Organismen notwendig sind. Erst durch die längerfristige Hälterung von marinen Organismen kann die Durchführung systematischer Versuchsreihen gelingen.

An diese bestehenden Forschungslücken, Fragestellungen und neue Anforderungen an Versuchseinrichtungen knüpft das Projekt EnviSim4Mare an. Im Rahmen des Projekts wird ein Salzwasser-Wellen-Strömungskanal mitsamt einer biologischen Hälterungsanlage (Recirculating Aquaculture System, RAS) gebaut, sodass mariner Bewuchs in nahezu realer Umgebung untersucht werden kann. Zusätzlich wird es ermöglicht, die Wellen-Strömungs-Interaktion an Pfählen mit marinem Bewuchs zu untersuchen. Somit können die

benötigten Erkenntnisse zur Umströmung und zur Bestimmung von Lastkoeffizienten für die Neubewertung bestehender Offshore-Windenergieanlagen, aber auch zur Auslegung und Planung für die Windenergieindustrie bereitgestellt werden. Im Projekt EnviSim4Mare werden die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse in realitätsnahen Lastsimulationen an Offshore-Windenergieanlagen weiterverarbeitet und durch ein sogenanntes Re-Assessment bewertet. Die Entwicklung verbesserter Ersatzmodelle von künstlichem marinem Bewuchs kann so angeregt werden, sodass auch hier weitere Forschung stimuliert werden kann. Unter Berücksichtigung dieses Gesamtkonzepts werden im Rahmen der vorliegenden Veröffentlichung folgende Aspekte aufgezeigt, die von dem Projektverbund aus Tab. 1 bearbeitet werden:

- › Beschreibung des aktuellen Planungsstands vom Salzwasser-Wellen-Strömungskanal und der peripheren Infrastruktur zur Hälterung von marinem Bewuchs (Kapitel 2).
- › Vorstellung eines innovativen Partikel Tracking Verfahrens durch Verwendung des Shake-the-Box Algorithmus (Kapitel 3).
- › Vergleich von marinem Bewuchs in der Natur und im Modell anhand einer experimentellen Studie unter Verwendung des Partikel Tracking Verfahrens (Kapitel 4).

Tab. 1: Auflistung der Projektkoordinatoren und Projektpartner im Verbundprojekt EnviSim4Mare.

Projektkoordinator

Technische Universität Braunschweig Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) Abt. Hydromechanik, Küsteningenieurwesen und Seebau Beethovenstr. 51a 38106 Braunschweig	Projektleitung Prof. Dr.-Ing. habil. Nils Goseberg
---	---

Projektpartner:

Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) Am Handelshafen 12 27570 Bremerhaven	Projektleitung Prof. Dr. Bela Buck
---	---------------------------------------

Jörss – Blunck – Ordemann GmbH Kaiser-Wilhelm-Straße 50 20355 Hamburg	Projektleitung Dipl.-Ing. Albrecht Victor
---	--

Ocean Breeze Energy GmbH & Co. KG Flughafenallee 11 28199 Bremen	Projektleitung Jean Huby Joachim Arndt
--	--

2. PLANUNG DES SALZWASSER-WELLEN-STRÖMUNGSKANALS

2.1 Wellen-Strömungs-Interaktion

In der Natur treten Einwirkungen durch Wellen und Strömungen kombiniert auf – so auch in den küstennahen Zonen der tideabhängigen Nordsee, in welchen eine Vielzahl an Offshore-Windenergieanlagen lokalisiert ist. In diesen Gebieten können harsche See- gang- und Strömungsbedingungen auftreten, die durch die flache Bathymetrie der Nordsee noch verstärkt werden (Buck und Buchholz 2005). Während der Planungsphasen müssen derartige Lastkombinationen sowie die Einflüsse durch Wellen-Strömungs-Interaktionen nicht nur für die Ermittlung der Maximallasten sondern auch für die langfristige Beanspruchung der Strukturen berücksichtigt werden (Robinson et al. 2015). Die Interaktionen zwischen Wellen und Strömung sind in der Literatur analysiert und diskutiert (Robinson et al. 2015; Kemp und Simons 1983, 1982; Zhang et al. 2022; Soulsby et al. 1993; Qi und Gao 2014).

Die Wellen-Strömungs-Interaktionen sind stark richtungsabhängig und werden häufig in Kanälen untersucht, um die Unterschiede zwischen gleichgerichteten und entgegengesetzten Wellen und (Tide-) Strömungen zu untersuchen. Dabei wurden insbesondere Einflüsse auf die Wellenlänge, die Wellenform (ggf. Änderung des Energieeintrags durch Windeinwirkung), die Geschwindigkeitsprofile über der Wassertiefe sowie der Turbulenzintensitäten und Schubspannungen an den Böden berücksichtigt.

Diese physikalischen Effekte führen zu signifikant veränderten hydraulischen Randbedingungen, weswegen die Erforschung von kombinierten Lasten durch Wellen und Strömungen auf Offshore-Windenergieanlagen notwendig ist. Mit dem Salzwasser-Wellen-Strömungskanal wird noch ein weiteres Forschungsfeld aufgespannt, bei dem die Rauheiten von marinem Bewuchs nicht mehr durch idealisierte Modelle abgebildet werden müssen, sondern Untersuchungen des lebenden Bewuchses (Theophanatos und Wolfram 1989; Schoefs et al. 2021; Sarakinos und Busse 2019) sowie realer Festigkeitskennwerte (Brenner und Buck 2010) durchgeführt werden können.

2.2 Salzwasser-Wellen-Strömungskanal

Der Salzwasser-Wellen-Strömungskanal (SWS-Kanal) wird am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig errichtet. Die Dimensionen des SWS-Kanals betragen 35 m × 3,0 m × 2,5 m mit einem Untersuchungsbereich von 14 m Länge. Ein unterirdisches Speicherbecken mit einem Volumen von 160 m³ wird verwendet, damit das Salzwasser in einem geschlossenen Kreislauf geführt werden kann.

Zur Erzeugung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s bei einem Wasserstand von 1,5 m werden vier Pumpen mit einem Gesamtvolumenstrom von bis zu 16.200 m³/h verwendet, die individuell geregelt werden können. Zur Wellenerzeugung und aktiven Absorption werden zwei gegenüberliegende Wellenmaschinen eingesetzt, um eine signifikante Wellenhöhe von bis zu 0,8 m zu erzeugen.

Für die Einstellung der erforderlichen Umweltbedingungen im SWS-Kanal und der Hälterungsinfrastruktur ist eine vielschichtige technische Ausrüstung erforderlich. Die Salzwasserlogistik zur Einstellung des Salzgehalts im SWS-Kanal zwischen 0,5% – 2,9% erfolgt in einem zusätzlichen Ansetzbecken, um eine homogene Verteilung sicherzustellen. Die Wasserbehandlung erfolgt in einem geschlossenen System über ein dreistufiges Filtersystem. Ferner können pH-Werte sowie Temperaturen (zwischen 5 – 20 °C) aufgezeichnet und an die Anforderungen zur Hälterung des marinen Bewuchses angepasst werden. Zur Auslegung wurden die Mindestanforderungen an die Hälterung der Gemeinen Miesmuschel (*Mytilus edulis*) bestimmt, die in Tab. 2 aufgelistet sind.

Tab. 2: Anforderungen an die Hälterung der gemeinen Miesmuschel (*Mytilus edulis*).

	Anforderung an die Hälterung von marinem Bewuchs (<i>Mytilus edulis</i>)
Salzgehalt [%]	0,5 – 4,2
Wassertemperatur [°C]	5 – 20
pH-Wert	7,3 – 8,2
Sauerstoffsättigung [%]	> 80
Kohlenstoffdioxid-Gehalt [mg/L]	0 – 20
Licht	keine erhöhten Anforderungen

Der SWS-Kanal wird vollständig eingehaust, sodass der Betrieb hinsichtlich energetischer und raumklimatischer Aspekte optimiert werden kann. Im Untersuchungsbereich wird ein innovatives 4D Partikel Tracking System unter Verwendung des Shake-the-Box Algorithmus von LaVision (Schanz et al. 2016) angebracht, welches über eine triaxiale Verfahrenseinheit millimetergenau angesteuert werden kann. Dies ermöglicht zeitlich und räumlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsfelder in einem Volumen der Größe 300 mm × 200 mm × 150 mm darzustellen und zu analysieren und somit die Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzentstehung im Nahbereich des marinen Bewuchses zu untersuchen. Zudem erfassen Ultraschallsensoren die Wasserspiegelauslenkung zur Analyse der Wellenbedingungen. Abb. 1 zeigt eine Visualisierung des SWS-Kanals sowie drei Fotografien von marinem Bewuchs, welche im Rahmen der Feldkampagnen von den Projektpartnern des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) aufgenommen wurden.

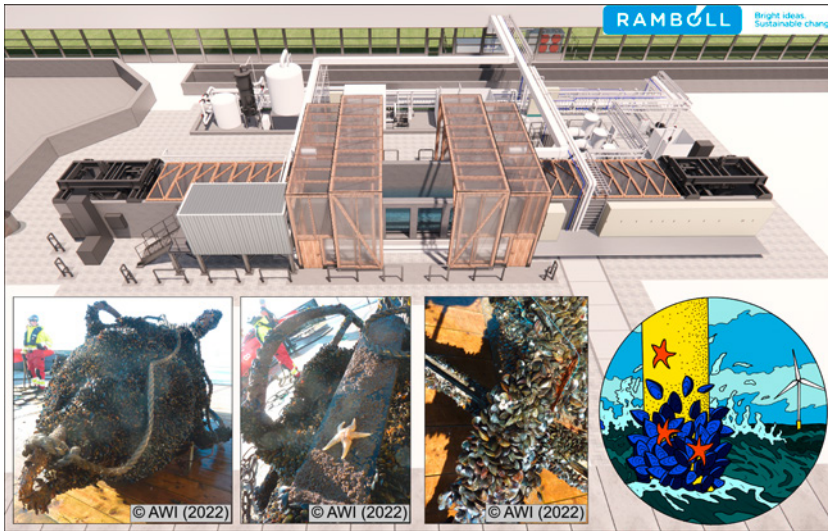


Abb. 1: Visualisierung des Salzwasser-Wellen-Strömungskanal sowie der Anlagentechnik, der Haltungsinfrastruktur und der Einhausung in Holzrahmen-Bauweise. Fotografien aus den Feldkampagnen des Alfred-Wegener-Instituts zeigen den marinen Bewuchs an Bojen, die zur Erprobung ausgebracht wurden (AWI 2022).

3. MESSTECHNIK IM SWS-KANAL

3.1 Hardware

Die Messung von flächenhaften Geschwindigkeiten über die Methoden der Bildverarbeitung ist bereits länger in der Wissenschaft verankert (Sciaccitano und Wieneke 2016; Lindken et al. 2009; Forouzi Feshalami et al. 2022). Jedoch konnten erst in den letzten Jahren einige Fortschritte in der volumetrischen Darstellung von Partikelgeschwindigkeiten in Unterwasser-Anwendungen gemacht werden, insbesondere infolge des robusten und präzisen Shake-the-Box Algorithmus (Schanz et al. 2016; Viola et al. 2022). Im SWS-Kanal wird daher ebenfalls ein Messinstrument eingesetzt, welches die Vorteile des Shake-the-Box Algorithmus nutzt – ein LaVision MiniShaker, welcher mit einer Leuchtdiode (LED) betrieben wird. Der MiniShaker sowie die LED sind über Rohre starr mit der Verfahrenheit verbunden und werden im Betrieb zusätzlich miteinander starr verbunden, um den Einfluss von Schwingungen zu minimieren. Zusätzlich werden die Kabel sowie die Schläuche des Kühlaggregats durch die Rohre geführt. Der LaVision MiniShaker besteht aus einem Kameragehäuse mit 730 mm Länge, in dem vier Kameras mit einer Auflösung von 896×656 Pixeln angeordnet sind (s. Abb. 2).

Der MiniShaker sowie die LED werden auf ein spezifisches Messvolumen in einer Distanz von 600 mm ausgerichtet. Die äußeren Kameras besitzen dabei einen Winkel von 28° zur Vertikalen. Obwohl der MiniShaker in alle Raumrichtungen bewegt werden kann, bleiben die Relativabstände und -winkel der Kameras konstant, sodass nur eine einzige Kalibrierung zu Beginn einer Messkampagne erforderlich wird. In dieser Konfiguration können alle Kameras mit einer maximalen Aufnahme Frequenz von bis zu 510 Hz be-



Abb. 2: Darstellung des LaVision MiniShakers (oben) und der LED (unten, grünes Licht) im 2m-Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau.

trieben werden, wodurch auch sehr kleine Bewegungen der Partikel sichtbar werden (bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s beispielsweise eine Distanz von 2 mm).

Das Messsystem erfordert das Vorhandensein von ausreichend vielen Seeding Partikeln, deren Bewegung aufgezeichnet werden kann. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass sich die Seeding Partikel mit dem umgebenden Wasser mitbewegen und nur geringe Modelleffekte auftreten, wie beispielsweise infolge einer zu hohen oder zu niedrigen Partikeldichte.

3.2 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung besteht aus einer Reihe an Algorithmen, mithilfe derer aus den Rohbildern schließlich dreidimensionale Geschwindigkeitsfelder erarbeitet werden. Die grundlegende Abfolge besteht aus der Kalibrierung, der Datenaufbereitung (Preprocessing), der volumetrischen Selbstkalibrierung (Volume-Self-Calibration), der Anwendung des Shake-the-Box Algorithmus und schließlich der Umrechnung auf ein regelmäßiges Gitter (Binning). Die einzelnen Schritte werden unter Verwendung der systemeigenen Software von LaVision durchgeführt und in ihren Einstellungen optimiert. Die Datenverarbeitungsschritte sind in der Literatur dokumentiert und diskutiert (Viola et al. 2022; Wieneke 2013; Schanz et al. 2016; Wieneke 2008). Die Schritte von den Rohdaten bis hin zu den umgerechneten Daten in einem Gitter sind in Abb. 3 visualisiert.

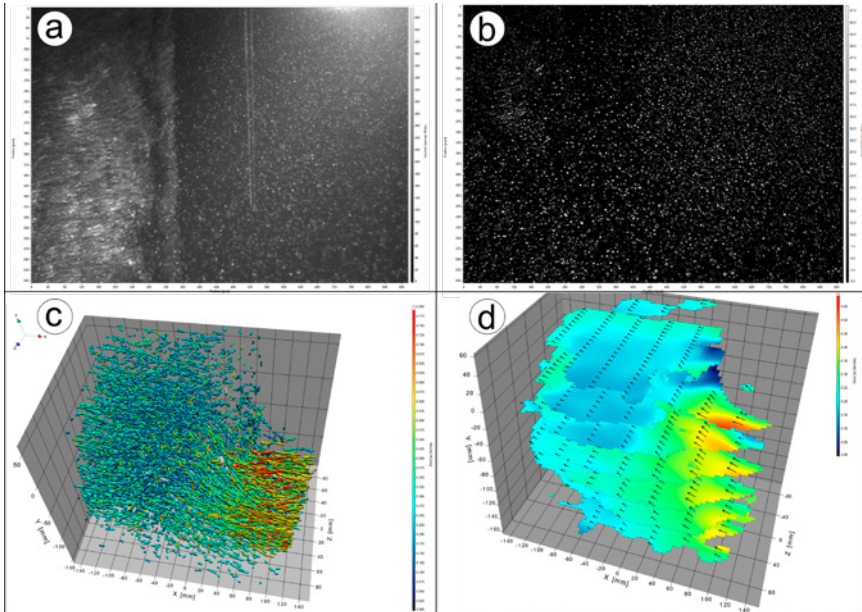


Abb. 3: Visualisierung der Datenverarbeitung bei der Verwendung des Shake-the-Box Partikel-Tracking-Verfahrens. Bild (a) zeigt die Rohbilder einer Kamera, die mithilfe von räumlichen und zeitlichen Vorverarbeitungsschritten (Preprocessing) in Bild (b) aufbereitet wurden. Nach Durchführung der Shake-the-Box Algorithmen erfolgt die Darstellung der einzelnen Partikelbahnen in Bild (c), welche für Bild (d) auf ein rechteckiges Gitter umgerechnet wurden (Binning).

4. MARINER BEWUCHS IN DER NATUR UND IM LABOR

4.1 Lebender mariner Bewuchs

Offshore-Windenergieanlagen werden bereits nach kurzer Zeit von Biofilm und marinem Bewuchs bewachsen. Die Arten des marinen Bewuchses unterscheiden sich in Abhängigkeit der Umwelteinflüsse (z. B. Temperatur, Strömungen) und sind somit regional und lokal unterschiedlich (Mesel et al. 2015; Hutchison et al. 2020). Ferner ist der Bewuchs auch über die Tiefe veränderlich und unterscheidet sich in der biologischen Zusammensetzung sowie hinsichtlich der mittleren Dicke und Flächengewichte (Wolfram und Theophanatos 1985; Mallat et al. 2014). Die zeitliche Sukzession von marinem Bewuchs wird nach Degraer et al. (2020) in drei Phasen beschrieben, die sich hinsichtlich der vorkommenden Arten aber auch hinsichtlich seines Einflusses auf Strömungen und Lasten unterscheiden. Der marine Bewuchs stellt somit eine zeitabhängige und räumlich veränderliche Rauheit dar.

4.2 Modellierung von marinem Bewuchs in hydraulischen Experimenten

Eine gängige Parametrisierung des marinen Bewuchses erfolgt über die relative Rauheit ($\varepsilon = k/D$), welche sowohl in Normen (Det Norske Veritas 2014) als auch in der Forschung (Zeinoddini et al. 2017; Shi et al. 2012) Anwendung findet. Diese Betrachtungsweise basiert auf dem effektiven Durchmesser D und der Rauheitshöhe k , welche als durchschnitt-

liche Höhe der Rauheit bzw. des marinen Bewuchses zwischen den Bergen und Tälern definiert werden kann (vgl. Abb. 4).

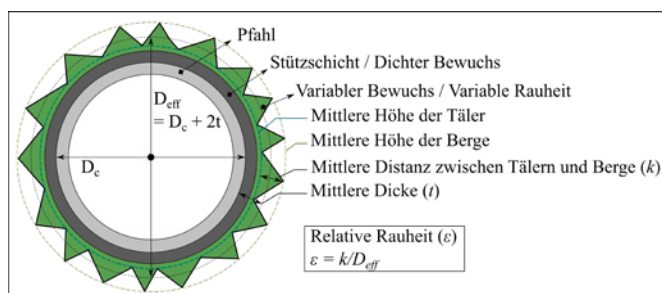


Abb. 4: Prinzipskizze der relativen Rauheit um einen Pfahl.

Anhand dieser Rauheitsdefinition wurden acht Pfahl-Versuchskörper mit 10 cm Durchmesser vorbereitet, die sowohl die Rauheitswirkung von hartem als auch von weichem marinem Bewuchs replizieren. Im Rahmen einer experimentellen Studie mit über 400 Versuchen wurden diese zwischen September und November 2021 im Wellenkanal des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau untersucht.

Eine Übersicht über die verwendeten Pfahlarten ist in Tab. 3 gegeben.

Tab. 3: Übersicht über die verwendeten Pfähle mit künstlichem marinem Bewuchs.

Beschreibung	Modell für marinen Bewuchs	Relative Rauheit ε
Referenz	Glatter Pfahl (Stahl)	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Schleifpapier P180	Harter mariner Bewuchs	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Schleifpapier P80	Harter mariner Bewuchs	$6,8 \cdot 10^{-3}$
Teppich 50 mm	Weicher mariner Bewuchs	$3,2 \cdot 10^{-1}$
Teppich 30 mm	Weicher mariner Bewuchs	$2,2 \cdot 10^{-1}$
Teppich 15 mm	Weicher mariner Bewuchs	$1,2 \cdot 10^{-1}$
Kunstrasen 30 mm	Starrer mariner Bewuchs	$2,2 \cdot 10^{-1}$
Kunstrasen 15 mm	Starrer mariner Bewuchs	$1,2 \cdot 10^{-1}$

Der 2m-Wellenkanal ist 95 m lang, 2 m breit und 1,25 m hoch und eignet sich dadurch für mittelskalige Untersuchungen von welleninduzierten Belastungen. Mit der Wellenmaschine, die über Kolben (Piston-type) angetrieben wird, wurden bei einem Wasserstand von 0,9 m regelmäßige Wellen mit Wellenperioden zwischen 2 s – 4 s sowie Wellenhöhen zwischen 0,10 m – 0,35 m erzeugt.

Neben einem Kraft-Momentensensor wurden Wellenpegel, induktive Strömungssensoren sowie das Shake-the-Box System verwendet. Die Messwerte wurden durch ein zentrales Datenerfassungssystem synchron erfasst.

Anhand ausgewählter Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden im Folgenden die beobachteten Unterschiede zwischen den Pfählen mit Modellen des marinen Bewuchses (Referenz, harter Bewuchs, weicher Bewuchs) für eine ausgewählte Wellenkonfiguration ($H = 0,3\text{ m}$; $T = 4,0\text{ s}$) veranschaulicht. Abb. 5 zeigt eine Draufsicht auf die Geschwindigkeitsfelder in x -Richtung, die infolge der Datenanalyse des Shake-the-Box-Systems erzeugt werden können.

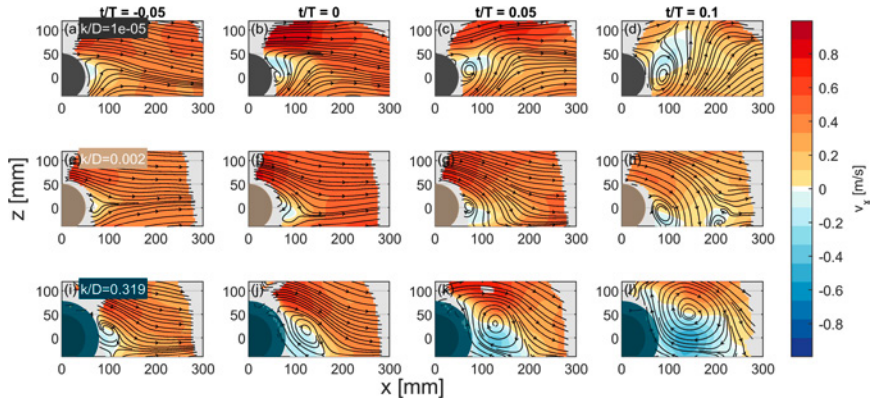


Abb. 5: Draufsicht auf die Geschwindigkeitsfelder in x -Richtung für eine reguläre Welle mit $H = 0,3\text{ m}$ und $T = 4,0\text{ s}$. Vier Zeitschritte sind von links nach rechts gezeigt ($t/T = -0,05 - 0,1$), wobei $t/T = 0$ den Zeitpunkt markiert, an dem der Wellenberg den Pfahl passiert. Drei Pfähle mit unterschiedlichem marinem Bewuchs sind in den Reihen dargestellt (oben, (a)-(d) – Referenzpfahl; mittig, (e)-(h) – harter mariner Bewuchs; unten, (i)-(l) – weicher mariner Bewuchs).

Die Geschwindigkeitsfelder zeigen eindrücklich die Auswirkungen der jeweiligen relativen Rauheit ($\varepsilon = k/D$) auf den Nachlaufbereich des Pfahls. Zunächst wirken die Pfähle als lokales Hindernis, sodass höhere Geschwindigkeiten am Rand des Pfahls auftreten und der direkte Schattenbereich vom Pfahl geschützt ist und negative Geschwindigkeiten aufweist. Diese Umströmungseigenschaften sind bei allen Pfählen sichtbar, wobei der Pfahl mit weichem Bewuchs einen hohen Geschwindigkeitsgradienten aufweist. Zudem ist bei diesem Pfahl der Nachlaufbereich besonders markant, sodass bereits nach kurzer Zeit zunächst ein asymmetrischer (j) Wirbel entsteht, der sich bei (k) und (l) in einen zunehmend rotationssymmetrischen Wirbel wandelt. Bei diesen Zeitsequenzen ($t/T = 0,05-0,1$) treten in den Strömungsfeldern des Referenzpfahls ((c)-(d)) und des Pfahls mit hartem marinem Bewuchs ((g)-(h)) alternierende Querströmungen und ein deutlich kleinerer nachgelagerter Wirbel auf.

Aus den hochaufgelösten Partikelfeldern lassen sich eine Vielzahl an volumetrischen Daten generieren, die sowohl qualitative Beschreibungen der entstehenden Umströmung zulassen aber auch quantitative Messwerte zu Geschwindigkeiten, Wirbelstärken und weiteren ableitbaren Größen ermöglichen.

5. WISSEN- UND WIRTSCHAFTLICHES POTENTIAL DES SWS-KANALS

Das Ziel des Vorhabens EnviSim4Mare ist ein verbessertes Verständnis der hydraulischen Prozesse an Offshore-Tragstrukturen hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen marinem Bewuchs und hydrodynamischer Belastung. Im Fokus steht dabei der SWS-Kanal, welcher gegenüber dem allgemeinen Standard weltweiter Forschungseinrichtungen neue Maßstäbe setzt. Durch die kombinierte Belastung aus Welle und Strömung, was der Überlagerung des Seegangs mit einer Tideströmung entspricht, sowie der Bereitstellung essentieller aquatischer Umweltparameter (Temperatur, pH-Wert, Salzgehalt) stellt der SWS-Kanal eine einzigartige Versuchseinrichtung dar. Hierdurch kann der Einfluss von lebendem marinem Bewuchs auf die hydraulischen Prozesse an Offshore-Tragstrukturen erstmals unter kontrollierten aber gleichzeitig realitätsnahen Bedingungen untersucht werden. Durch dieses Alleinstellungsmerkmal schafft der SWS-Kanal neue Untersuchungsmöglichkeiten für zukunftsrelevante Fragestellungen sowohl aus wissenschaftlicher als auch wirtschaftlicher Sicht.

Das Partikel Tracking Verfahren ermöglicht die hochaufgelöste Messung von Geschwindigkeitsfeldern und konnte ihr Potential in Untersuchungen von vereinfachten Ersatzmodellen unter Beweis stellen. Dabei werden die Ergebnisse analysiert und interpretiert, um die Umströmung von lebendem Bewuchs und künstlichen Ersatzmodellen zu vergleichen. Abweichungen zwischen Natur und Modell werden dargelegt, sodass eine Verbesserung der bestehenden Ersatzmodelle erarbeitet werden kann. Dadurch entsteht ein Multiplikatoreffekt, sodass auch andere Forschungsinstitute die Ergebnisse aus Laborversuchen von marinem Bewuchs nutzen können. Ferner entsteht wichtiges Grundlagenwissen zum Einfluss von marinem Bewuchs auf die Umströmung, welche wiederum die Lasten auf Offshore-Strukturen bedingen.

Die im laufenden Vorhaben aus den experimentellen Untersuchungen erlangten Erkenntnisse hinsichtlich der hydraulischen Belastung bewachsener Pfahlstrukturen werden gleichzeitig für die Entwicklung und Verbesserung von Bemessungsansätzen für Offshore-Tragstrukturen genutzt und für die Ingenieurpraxis aufbereitet, woraus erhebliche Potentiale in Bezug auf die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit durch Material- und Kosteneinsparungen erwartet werden. Somit können Unternehmen aus der maritimen Industrie (bspw. Offshore-Windenergie, Öl- und Gas-Industrie) unmittelbar von den wissenschaftlichen Ergebnissen aus dem Projekt profitieren. Darüber hinaus steht mit dem SWS-Kanal ein hochinnovatives Testlabor für zukünftige Fragestellungen zur Verfügung und ermöglicht so verschiedenen Forschungs- und Industriepartnern, bspw. aus den Bereichen Schiffstechnik, schwimmende Photovoltaik, Tide- und Wellenenergie oder LNG-Terminals, neue Konzepte unter kontrollierten und realitätsnahen Bedingungen hinsichtlich der Salzwasser-Wellen-Strömungs-Bauwerks-Interaktion zu untersuchen.

LITERATUR

- [1] Arcigni, Francesco; Abhinav, K. A.; Collu, Maurizio; Venturini, Mauro (2021): Analysis of Tripod Supported Offshore Wind Turbines under Conditions of Marine Growth. In: *Ocean Engineering* 220, S. 108441. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108441.
- [2] AWI (2022): Fotos der bewachsenen Tonnen, 08.03.2022. Mail an Clemens Krautwald.
- [3] Brenner, M.; Buck, B. H. (2010): Attachment properties of blue mussel (*Mytilus edulis* L.) byssus threads on culture-based artificial collector substrates. In: *Aquacultural Engineering* 42 (3), S. 128–139. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2010.02.001.
- [4] Buck, Bela Hieronymus; Buchholz, Cornelia Maria (2005): Response of offshore cultivated *Laminaria saccharina* to hydrodynamic forcing in the North Sea. In: *Aquaculture* 250 (3-4), S. 674–691. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2005.04.062.
- [5] Degraer, Steven; Carey, Drew; Coolen, Joop; Hutchison, Zoë; Kerckhof, Francis; Rumes, Bob; Vanaverbeke, Jan (2020): Offshore Wind Farm Artificial Reefs Affect Ecosystem Structure and Functioning: A Synthesis. In: *Oceanog* 33 (4), S. 48–57. DOI: 10.5670/oceanog.2020.405.
- [6] Denny, Mark W.; Gaylord, Brian (2010): Marine ecomechanics. In: *Annual review of marine science* 2, S. 89–114. DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081011.
- [7] Det Norske Veritas (2014): DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads.
- [8] Forouzi Feshalami, Behzad; He, Shuisheng; Scarano, Fulvio; Gan, Lian; Morton, Chris (2022): A review of experiments on stationary bluff body wakes. In: *Physics of Fluids* 34 (1), S. 11301. DOI: 10.1063/5.0077323.
- [9] Hutchison, Zoë; Bartley, Monique; Degraer, Steven; English, Paul; Khan, Anwar; Livermore, Julia et al. (2020): Offshore Wind Energy and Benthic Habitat Changes: Lessons from Block Island Wind Farm. In: *Oceanog* 33 (4), S. 58–69. DOI: 10.5670/oceanog.2020.406.
- [10] Kemp, P. H.; Simons, R. R. (1982): The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating with the current. In: *J. Fluid Mech.* 116, S. 227–250. DOI: 10.1017/S0022112082000445.
- [11] Kemp, P. H.; Simons, R. R. (1983): The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating against the current. In: *J. Fluid Mech.* 130 (-1), S. 73. DOI: 10.1017/S0022112083000981.
- [12] Kerckhof, F.; Rumes, B.; Degraer, S. (2019): About "Mytilisation" and "Slimeification": a decade of succession of the fouling assemblages on wind turbines off the Belgian coast. In: *Memoirs on the Marine Environment*.

- [13] Landmann, Jannis; Ongsiek, Thorsten; Goseberg, Nils; Heasman, Kevin; Buck, Bela; Paffenholz, Jens-André; Hildebrandt, Arndt (2019): Physical Modelling of Blue Mussel Dropper Lines for the Development of Surrogates and Hydrodynamic Coefficients. In: *JMSE* 7 (3), S. 65. DOI: 10.3390/jmse7030065.
- [14] Lee, Joyce; Zhao, Feng (2022): Global Wind Report 2022 | GWEC.
- [15] Lindken, Ralph; Rossi, Massimiliano; Grosse, Sebastian; Westerweel, Jerry (2009): Micro-Particle Image Velocimetry (microPIV): recent developments, applications, and guidelines. In: *Lab on a chip* 9 (17), S. 2551–2567. DOI: 10.1039/b906558j.
- [16] Mallat, Chadi; Corbett, Alistair; Harris, Glyn; Lefranc, Marc (2014): Marine Growth on North Sea Fixed Steel Platforms: Insights From the Decommissioning Industry.
- [17] Martinez-Luengo, M.; Causon, P.; Gill, A. B.; Kolios, A. J. (2017): The effect of marine growth dynamics in offshore wind turbine support structures. In: C. Guedes Soares und Y. Garbatov (Hg.): *Progress in the Analysis and Design of Marine Structures*: CRC Press, S. 889–898.
- [18] Mesel, Ilse de; Kerckhof, Francis; Norro, Alain; Rumes, Bob; Degraer, Steven (2015): Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. In: *Hydrobiologia* 756 (1), S. 37–50. DOI: 10.1007/s10750-014-2157-1.
- [19] Musial, Walter; Spitsen, Paul; Beiter, Philipp; Duffy, Patrick; Marquis, Melinda; Cooperman, Aubryn et al. (Hg.) (2021): *Erneuerbare Energien in Zahlen*.
- [20] Nedrebø, Eirik Leikvoll (2014): Experimental Investigation of Marine Fouling on Piles in Currents.
- [21] Qi, Wen-Gang; Gao, Fu-Ping (2014): Physical modeling of local scour development around a large-diameter monopile in combined waves and current. In: *Coastal Engineering* 83, S. 72–81. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.10.007.
- [22] Raffel, Markus; Willert, Christian E.; Scarano, Fulvio; Kähler, Christian J.; Wereley, Steve T.; Kompenhans, Jürgen (2018): *Particle Image Velocimetry*. Cham: Springer International Publishing.
- [23] Resvanis, Themistocles L.; Rao, Zhibiao; Vandiver, J. Kim (2014): Effects of Strake Coverage and Marine Growth on Flexible Cylinder VIV. In: *Volume 2: CFD and VIV. ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. San Francisco, California, USA, 08.06.2014 - 13.06.2014: American Society of Mechanical Engineers.
- [24] Robinson, Adam; Ingram, David; Bryden, Ian; Bruce, Tom (2015): The effect of inlet design on the flow within a combined waves and current flumes, test tank and basins. In: *Coastal Engineering* 95, S. 117–129. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.10.004.

- [25] Santos, Francisco de Nolasco; Noppe, Nymfa; Weijtjens, Wout; Devriendt, Christof (2022): Data-driven farm-wide fatigue estimation on jacket-foundati-on OWTs for multiple SHM setups. In: *Wind Energ. Sci.* 7 (1), S. 299–321. DOI: 10.5194/wes-7-299-2022.
- [26] Sarakinos, Sotirios; Busse, Angela (2019): An Algorithm for the Generation of Biofouled Surfaces for Applications in Marine Hydrodynamics. In: Esteban Ferrer und Adeline Montlaur (Hg.): *Recent Advances in CFD for Wind and Tidal Offshore Turbines*. Cham: Springer International Publishing (Springer Tracts in Mechanical Engineering), S. 61–71.
- [27] Sarpkaya, T. (1990): On the Effect of Roughness on Cylinders.
- [28] Schanz, Daniel; Gesemann, Sebastian; Schröder, Andreas (2016): Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities. In: *Exp Fluids* 57 (5). DOI: 10.1007/s00348-016-2157-1.
- [29] Schoefs, Franck; Boukinda, Morgan; Guillo, Christophe; Rouhan, Antoine (2005): Fatigue of Jacket Platforms: Effect of Marine Growth Modelling. In: *ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- [30] Schoefs, Franck; O’Byrne, Michael; Pakrashi, Vikram; Ghosh, Bidisha; Oumouni, Mestapha; Soulard, Thomas; Reynaud, Marine (2021): Fractal Dimension as an Effective Feature for Characterizing Hard Marine Growth Roughness from Underwater Image Processing in Controlled and Uncontrolled Image Environments. In: *JMSE* 9 (12), S. 1344. DOI: 10.3390/jmse9121344.
- [31] Sciacchitano, Andrea; Wieneke, Bernhard (2016): PIV uncertainty propagation. In: *Meas. Sci. Technol.* 27 (8), S. 84006. DOI: 10.1088/0957-0233/27/8/084006.
- [32] Shi, Wei; Park, Hyun-Chul; Baek, Jae-Ha; Kim, Chang-Wan; Kim, Young-Chan; Shin, Hyun-Kyoung (2012): Study on the marine growth effect on the dynamic response of offshore wind turbines. In: *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 13 (7), S. 1167–1176. DOI: 10.1007/s12541-012-0155-7.
- [33] Soulsby, R. L.; Hamm, L.; Klopman, G.; Myrhaug, D.; Simons, R. R.; Thomas, G. P. (1993): Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. In: *Coastal Engineering* 21 (1-3), S. 41–69. DOI: 10.1016/0378-3839(93)90045-A.
- [34] Theophanatos, A.; Wolfram, J. (1989): Hydrodynamic Loading on Macro-Roughened Cylinders of Various Aspect Ratios.
- [35] Tian, Xiaojie; Li, Daoxi; Liu, Guijie; Xie, Yingchun; Deng, Wei; Xie, Dashuai (2020): Experimental study on the hydrodynamic characteristics of cylinder with rough surface. In: *J Mar Sci Technol* 25 (3), S. 842–848. DOI: 10.1007/s00773-019-00684-7.

- [36] van Paul Hinsberg, Nils (2021): Mean and unsteady loading on square prisms with rounded edges: Hard marine growth, incidence, and Reynolds number effects. In: *Marine Structures* 75, S. 102886. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102886.
- [37] Vested, Malene Hovgaard; Carstensen, Stefan; Christensen, Erik Damgaard (2020): Experimental study of wave kinematics and wave load distribution on a vertical circular cylinder. In: *Coastal Engineering* 157, S. 103660. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103660.
- [38] Viola, Ignazio Maria; Nila, Alex; Davey, Thomas; Gabl, Roman (2022): Underwater LED-based Lagrangian particle tracking velocimetry. In: *J Vis.* DOI: 10.1007/s12650-022-00832-z.
- [39] Wieneke, B. (2008): Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry. In: *Exp Fluids* 45 (4), S. 549–556. DOI: 10.1007/s00348-008-0521-5.
- [40] Wieneke, Bernhard (2013): Iterative reconstruction of volumetric particle distribution. In: *Meas. Sci. Technol.* 24 (2), S. 24008. DOI: 10.1088/0957-0233/24/2/024008.
- [41] Wolfram, J.; Naghipour, M. (1999): On the estimation of Morison force coefficients and their predictive accuracy for very rough circular cylinders. In: *Applied Ocean Research* 21 (6), S. 311–328. DOI: 10.1016/S0141-1187(99)00018-8.
- [42] 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.
- [43] Zeinoddini, M.; Bakhtiari, A.; Schoefs, F.; Zandi, A. P. (2017): Towards an understanding of marine fouling effects on the vortex-induced vibrations of circular cylinders: partial coverage issue. In: *Biofouling* 33 (3), S. 268–280. DOI: 10.1080/08927014.2017.1291803.
- [44] Zhang, Xuan; Simons, Richard; Zheng, Jinhai; Zhang, Chi (2022): A review of the state of research on wave-current interaction in nearshore areas. In: *Ocean Engineering* 243, S. 110202. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110202.
- [45] Zhou, Bo; Wang, Xikun; Gho, Wie Min; Tan, Soon Keat (2015): Force and flow characteristics of a circular cylinder with uniform surface roughness at subcritical Reynolds numbers. In: *Applied Ocean Research* 49, S. 20–26. DOI: 10.1016/j.apor.2014.06.002.
- [46] Ziegler, Lisa; Muskulus, Michael (2016a): Fatigue reassessment for lifetime extension of offshore wind monopile substructures. In: *J. Phys.: Conf. Ser.* 753, S. 92010. DOI: 10.1088/1742-6596/753/9/092010.
- [47] Ziegler, Lisa; Muskulus, Michael (2016b): Lifetime Extension of Offshore Wind Monopiles: Assessment Process and Relevance of Fatigue Crack Inspection.

EASE –

KI-BASIERTE ASSISTENZ FÜR FORENSISCHE ERMITTLUNGEN AUF SEE

AUTOREN

SONJA SIEVI	AIRBUS
DR. BERTRAM WORTELEN	HUMATECTS GMBH
M. SC. CHRISTINA TSIROGLOU	DLR – INSTITUT SYSTEMS ENGINEERING FÜR ZUKÜNFTIGE MOBILITÄT
DR. SILVIA FOERDERREUTHER	BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (BSH)
MAYBRITT MEYER	BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE (BSH)
OLIVER PFEIFFER	AIRBUS

1. MARITIME ERMITTLUNGSSZENARIOEN

Zur Gewährleistung der maritimen Sicherheit sind in der BRD Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) in der maritimen Sicherheit beauftragt. Die Behörden sind in dem gemeinsamen Lagezentrum See im Maritimen Sicherheitszentrum in Cuxhaven vertreten. Gleichzeitig kooperieren sie miteinander, um im Falle von größeren oder kritischen Vorfällen diese gemeinsam, unter der Leitung des Havariekommandos, schnellstmöglich zu bewältigen.

In diesem Rahmen lassen sich drei größere Aufgabenbereiche identifizieren, für die sich das Projekt EASE zum Ziel gesetzt hat, die Arbeit der Behörden zu unterstützen.

Unfälle auf See

Es kommt immer wieder vor, dass Frachtgut bei Sturm über Bord geht. Bei solchen oder ähnlichen Havarien ist entscheidend, direkt nach der Ereignismeldung mögliche Auswirkungen auf den Schiffsverkehr, Infrastruktur und Umwelt einzuschätzen. Dadurch lassen sich Warnungen in den betroffenen Gebieten kurzfristig aussprechen und das Risiko einer breiten Kontamination der Umwelt durch Giftstoffe reduzieren. Darüber hinaus gilt es, durch eine verbesserte Datenlage möglichst frühzeitig die Einsatzplanung zu unterstützen und auf Basis neuer Erkenntnisse fortlaufend Suchbereiche zu präzisieren.

Organisierte Kriminalität

Bei der organisierten Kriminalität werden im Rahmen von Untersuchungen zu Verdachtsmomenten sowie Routinekontrollen von Schiffen regelmäßig illegale Schmuggelwaren aufgefunden. Hierbei gilt es, die Herkunft dieser illegalen Waren und die meist wiederkehren-

den Transportwege detailliert zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, alle potenziell beteiligten Schiffe zeitnah zu identifizieren, bevor diese die regionalen Gewässer wieder verlassen. Dies bedeutet, dass für eine große Menge an Schiffen, die exakten Routen, auffällige Manöver sowie die Liste der angelaufenen Häfen analysiert und korreliert werden müssen. Schiffspapiere und Schiff-Tracking-Datenbanken stellen in solchen Fällen nur bedingt belastbare Informationen bereit, da Hafenaufenthalte und Fahrtrouten leicht (vorsätzlich) verschleiert werden können. Insbesondere die Korrelation mehrerer Schiffrouten, um mögliche Übergaben auf See oder andere Auffälligkeiten zu entdecken, ist oftmals nur mit hohem manuellem Aufwand möglich.

Umweltverschmutzung

Bei eingeleiteten Schadstoffen oder aufgefundenen Treibgütern müssen rückwirkend die Verursacher der Gewässerverunreinigungen identifiziert werden. Hierbei sind oft zeitintensive behördliche Recherchemaßnahmen einschließlich übergreifender Amtsleistungen (z. B. Driftberechnungen vom BSH) erforderlich. Die in diesem Zusammenhang notwendigen Tätigkeiten können mehrere Personen beschäftigen und sich über längere Zeiträume erstrecken. Besonders schädlich sind hierbei mehrfache Iterationszyklen, da diese den Ermittlungsprozess verlängern. Damit gegebenenfalls Probeentnahmen oder Inspektionen vor Ort erfolgen können, sind jedoch zeitnah vorliegende Ergebnisse erforderlich.

2. HERAUSFORDERUNGEN

Den BOS in der maritimen Sicherheit stehen bei der Erfüllung ihrer Aufgaben eine Reihe von Herausforderungen gegenüber. Aus operationaler Perspektive sind schnelle Ermittlungsergebnisse notwendig, da diese der Gefahrenabwehr dienen. Hierbei ist ein schneller Zugriff auf Beweismaterialien, Indizien und möglichen Verursachern ein zentraler Faktor.

Die stetige Zunahme an Schiffsverkehr und wachsenden wirtschaftlichen Aktivitäten auf See erzeugen enorme Datenmengen. Im Jahr 2019 lagen 189.800.000.000 AIS-Positionsmeldungen pro Jahr vor¹. Gleichzeitig steigt die Verfügbarkeit von Datenquellen (wie AIS-Daten, Wetter- und hydrographische Daten, Schiffsregister, Sicherheitsreports, Satellitenbilder), die bei der Erfassung von Indizien und Verursachern sinnvolle Informationen liefern können. Dieser stetige Wandel erfordert eine Anpassung der Aufgabenstellungen für die Nutzer in der maritimen Sicherheit ebenso wie der Werkzeuge und Systeme zur Erfüllung der Aufgaben.

Existierende Systeme sind von ihrer Architektur weder auf diesen Wandel noch auf die stetig wachsenden Datenmengen und Anforderungen ausgelegt. Zum einen verhalten sich Systeme aufgrund großer Datenmengen langsam, zum anderen sind sie nicht für die Komplexität der Ermittlungstätigkeiten ausgelegt und erweisen sich daher als benutzerunfreundlich. Es sind viele manuelle Schritte notwendig, da Funktionen über unterschiedliche Anwendungen verteilt sind, andere Funktionen werden von den Anwendungen nicht oder nur unzureichend unterstützt. Insbesondere müssen Ergebnisse und Teilergebnisse manuell miteinander in Beziehung gesetzt und ausgewertet werden.

3. ZIELE

Ziel des Projekts EASE ist es, den genannten Herausforderungen effektiv zu begegnen und Ermittlungsarbeiten für die BOS zu beschleunigen und zu vereinfachen. Um das genannte Ziel zu erreichen, wurde bei der Entwicklung konsequent darauf geachtet, dass die EASE-Software bei allen Bediensritten aus Sicht des Nutzers drei Eigenschaften aufweist:

Einfach

Intuitive und vereinfachte Bediensritte verringern die Fehleranfälligkeit (Blackler et al. 2011) und Komplexität bei der Eingabe.

Reaktiv

Unterbrechungen in Arbeitsabläufen haben einen enormen Einfluss auf die Güte der zu bearbeitenden Aufgabe. Auch kurze Unterbrechungen führen dazu, dass Menschen einen Aufgabenwechsel durchführen. Je nach Dauer und Art des Aufgabenwechsels muss der Inhalt des Arbeitsgedächtnis oder ein Teil dessen verworfen und bei späterer Rückkehr zur Aufgabe wiederhergestellt werden. Dies ist häufig nicht vollständig möglich.

Das Ziel von EASE war es, sowohl technologie- als auch prozessbedingte Unterbrechungen zu identifizieren und die Unterbrechungen so weit wie möglich mit hochreaktiver Technologie zu eliminieren.

Aufgabenangepasst

Maritime Ermittlungsarbeiten können u. a. durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Datenquellen, wie AIS- sowie Wetter- und hydrographische Daten, sehr komplex und aufwendig sein. Sie müssen herangezogen und integriert werden, wobei sich die Datenanalyse der Ermittler aus vielen teils iterierenden Arbeitssritten zusammensetzt. Zudem können sich die Aufgaben der Ermittler mit der Zeit ändern, wenn sich Einflussfaktoren ändern.

Das Ziel von EASE war es, eine Bedienschnittstelle zu konzipieren, die optimal auf die Aufgaben der Ermittler angepasst ist, in der Lage ist komplexe Arbeitsprozeduren zu unterstützen und sich dynamisch an geänderte Rahmenbedingungen anpassen lässt.

4. KONZEPTENTWICKLUNG UND UMSETZUNG

Im Projekt wurde ein Softwaresystem mit den oben beschriebenen Eigenschaften konzipiert. Hierzu evaluierte und nutzt EASE neueste Assistenz- und Interaktionstechnologien unter Zuhilfenahme von KI-Verfahren für die Vereinfachung von komplexen Arbeitsabläufen und der echtzeitfähigen Aufbereitung und Bereitstellung großer Datenmengen. Zentrale Elemente sind dabei das Design der Bedienoberfläche, ebenso wie die Integration, Verarbeitung, Speicherung sowie die visualisierungsspezifische Aufbereitung der Daten.

4.1. SMART DATA PREPARATION

Um eine verzögerungsfreie Navigation in der Kartenanwendung zu gewährleisten, wurde ein neuartiges Konzept des Data Index zur Datenaufbereitung, Haltung und Übertragung zum Browser entwickelt., umgesetzt und anschließend ein Benchmarking durchgeführt. In der Regel fokussieren sich Technologien entweder auf den Aspekt der effizienten Datenübertragung oder auf den Aspekt der Datenspeicherung. Das Konzept des Data Index berücksichtigt jedoch beide Aspekte, wobei die Parametrisierung und die Selektion spezifischer Modi es erlaubt, eine besondere Betonung auf extrem schnelle Datenübertragung oder extrem komprimierte Datenspeicherung zu legen. Das Funktionsprinzip gliedert sich in folgende Schritte:

Bei der Datenquelle handelt es sich um strukturierte Daten. Die Struktur der Daten kann mit dem Encoding Algorithmus trainiert werden oder es wird ein Mapping angelegt. Anschließend werden die Daten kodiert und komprimiert. So können sie in der Datenhaltung abgelegt oder zur EASE-Bedienoberfläche übertragen werden. Folgende Aspekte tragen dabei zur Effizienz und Performanz bei:

- › Der gesamte Prozess der Datenverarbeitung verursacht keinerlei Garbage Collection, wodurch, erhebliche Verzögerungen vermieden werden.
- › Bei der Datenübertragung wird bei einem langsamen Empfang der Daten ein Rückstau vermieden, indem die einzelnen Pakete automatisch zusammengefasst werden.
- › Die Kodierung der Daten nutzt besonders effiziente Algorithmen.
- › Die Komprimierung der Daten erfolgt automatisiert, wobei der Algorithmus den jeweils optimalen Kompressionsalgorithmus wählt.

Das Benchmarking hat gezeigt, dass die Data Index-Technologie bei der Verarbeitung von 33.000 AIS-Positionsmeldungen um einen Faktor von 3,5 effizienter in Latenz und Übertragung im Vergleich zu ProtoBuf ist.

Diese Technologie bildet die Grundlage für die Erfüllung des Ziels einer einfachen und reaktiven Interaktion.

4.2. EASE-USER INTERFACE

Die EASE-Bedienoberfläche wurde als browserbasierte Anwendung umgesetzt. Der Fokus des gesamten Designs lag dabei auf einer einfachen und reaktiven Bedienung. Die Navigation in Raum und Zeit mit einer komplexen Verkehrssituation erfordert neuartige Interaktionsmechanismen. Die Bedienung ist mit Hilfe verschiedener Eingabemethoden möglich.

Die Bedienoberfläche ist als Workbench gestaltet (s. Abb. 1). Darin werden aufgabenbereichsspezifische Funktionen in unterschiedliche Unterfenster (Views) strukturiert. Dadurch können alle Funktionen in ein Softwaresystem integriert und gebündelt werden.

In der Mitte befindet sich die interaktive Karte und seitlich interaktive Panels, die eingeblendet werden können.

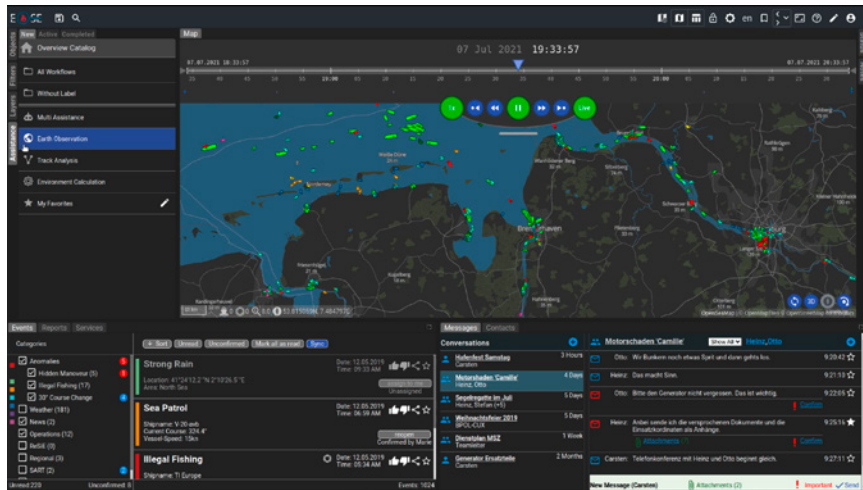


Abb. 1: EASE-Workbench.

Die Nutzer sollen dadurch, sowohl bei ihren täglichen Routinearbeiten als auch in kritischen Situationen unterstützt werden. Die Grundlage der Karte bilden folgende Elemente:

- › Layer-Manager: Sofern nicht auf Bild- oder Videoformatbasierend wird jegliches Kartenmaterial mit Vektor Tiles abgebildet.
- › Bei Verwendung der 3D-Darstellung werden Karteninformationen und Objekte ab einer bestimmten Zoomstufe automatisch plastisch dargestellt. Ebenso lassen sich Bild- und Videodaten in der Ebene kippen.
- › Schiffsmodelle: Die Schiffsmodelle wurden in Abstimmung mit den assoziierten Partnern in 2D und 3D entworfen. Die Farben der Schiffstypen entsprechen dabei dem IMO-Standard und dessen Form lässt erkennen welche Funktion ein Schiff hat. Für die Darstellung werden ebenfalls Größen- als auch Orientierungsinformationen, die aus AIS-Daten ermittelt werden, genutzt. Dadurch ist es auch bei niedriger Zoomstufe möglich, größere Schiffe von kleineren zu unterscheiden. Ebenso nähert sich die Darstellung bei größeren Zoomstufen den realen Werten an (s. Abb. 2).
- › Raum-Zeit-Navigation: Bei der weltweiten Navigation kann sich der Nutzer verzögerungsfrei per zooming und panning bewegen. Gleichzeitig kann der Time-Controller zur Navigation in der Zeit genutzt werden.
- › Time-Controller: Ein Interaktionselement für die Navigation in der Zeit. Das Bedienkonzept sieht vor, dass ein Benutzer in der Karte weltweit im Zeitraum von zehn Jahren frei navigieren kann. Die Reaktionszeit des Systems bleibt reaktiv, das heißt der Nutzer wird nicht durch Wartezeiten ausgebremst, wie es bei ähnlichen Systemen der Fall ist.

Bestimmte Aufgaben, wie das Nachvollziehen von Schiffsrouten über längere Strecken bei der Verfolgung von illegalem Abwracken, werden dadurch ermöglicht.

- › Der Nutzer hat die Möglichkeit verschiedene vergangene Zeitpunkte darstellen zu lassen und die Geschwindigkeit der Zeitreise zu steuern.

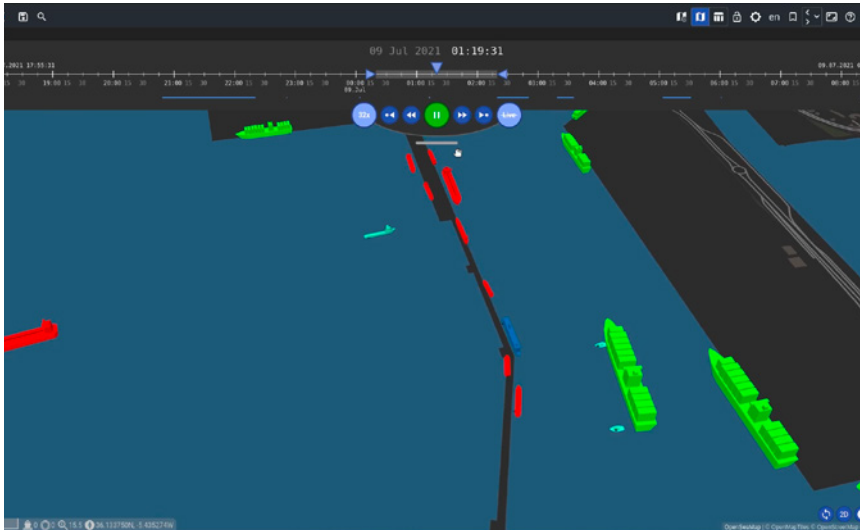


Abb. 2: Schiffsmodelle.

5. AUFGABENANGEPASSTES USER INTERFACE (UI)

Die verzögerungsfreie Navigation ermöglicht eine deutlich dynamischere Arbeitsweise, da beliebig häufig Ort, Zeitpunkt oder Perspektive des Lagebildes ohne Aufwand gewechselt werden kann. Um diese Dynamik zu fördern, wurden zusätzlich die im Folgenden aufgelisteten Funktionen in die Bedienschnittstelle integriert.

5.1. MULTIMAP-VIEW

Die schnelle Navigation durch die Daten und die gleichzeitige Darstellung mehrerer Lagebilder können Multitasking-Situationen, wie bei der Beobachtung unabhängiger Lagebilder in Echtzeit, unterstützen. Der Nutzer kann sich dazu verschiedene Lagebilder nebeneinander anzeigen lassen (s. Abb. 3) oder diese in Tabs organisieren und zwischen diesen wechseln.

Um Vergleichssituationen zu vereinfachen, wurde eine weitere Multi-View-Funktion in das System integriert. Hierbei können die Zeitpunkte der unterschiedlichen Datenebenen aus denen das Lagebild gebildet wird, wie Ebenen für Wassertiefen, Schiffsverkehr und Satellitenbilder (s. Abb. 3), angepasst werden und mehrere Lagebilder vereint werden. So kann der Nutzer unter anderem die Schiffsbewegungen in einem Seegebiet zu zwei verschiedenen Zeitpunkten direkt vergleichen, indem er eine zweite Schiffsverkehrsebene einfügt.

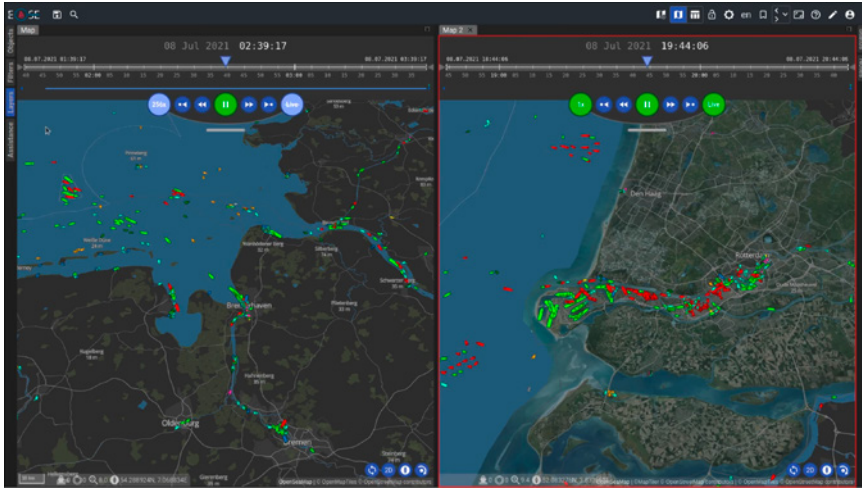


Abb. 3: Multi-Map-View.

5.2. BOOKMARKS

Um den Nutzer bei der Navigation zusätzlich zu unterstützen, wurde das aus Browsern bekannte Bookmark-Konzept integriert. Möchte der Nutzer ein Seegebiet häufiger aufsuchen, so kann er den entsprechenden Kartenausschnitt manuell als Bookmark speichern und direkt dorthin navigieren. Solche direkten Navigationen über Links werden in der Software an verschiedenen Stellen ermöglicht. Um aufwendiges manuelle Navigieren durch Bewegungen der Karte zu verhindern, um zum letzten Ort zu gelangen, erzeugt die Software automatische Bookmarks. Der Nutzer kann durch eine Vor- und Zurück-Funktion (s. Abb. 4, oben rechts) durch diese navigieren und so effizient zwischen verschiedenen Lagebildern hin und her wechseln.

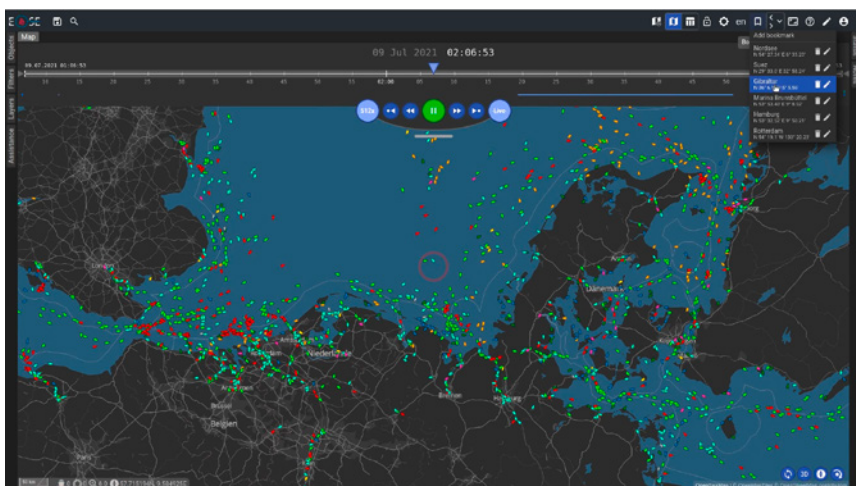


Abb. 4: Bookmarks.

5.3. EREIGNISPUNKTE

Neben der Möglichkeit Links zu einem Kartenausschnitt zu definieren, können sie auch zu bestimmten Zeitpunkten gesetzt werden. Diese Funktion kann unter anderem für die Unterstützung des Nutzers bei der Analyse von Schiffsbewegungen einzelner Verkehrsteilnehmer genutzt werden. Soll beispielsweise ermittelt werden, ob bei der Fahrt eines Schiffes Auffälligkeiten aufgetreten sind, muss im Normalfall die komplette Schiffsbewegung verfolgt werden. Große Teile der Fahrt könnten jedoch für die Ermittlung uninteressant sein. Die EASE-Software unterstützt diese Aufgabe gezielt, indem interessante Ereignisse für die Routen ausgewählter Schiffe automatisch identifiziert und auf der Zeitachse markiert werden (s. Abb. 5). Durch das Anklicken der Markierung kann direkt zum Ort und Zeitpunkt des Ereignisses gesprungen werden. Durch eine Vor- und Zurückfunktion kann der Nutzer von einem Ereignis zum nächsten springen, ohne manuell navigieren zu müssen.

Für eine Schiffsroute lassen sich verschiedene Arten von Ereignissen identifizieren, z. B. Ausfall der AIS-Daten, ungewöhnliche Schiffsbegegnungen und -bewegungen. Ereignisse können dabei je nach Art unterschiedlich erkannt werden. Dazu wird auf KI-Verfahren zurückgegriffen in denen das Normalverhalten des maritimen Verkehrs feingranular hinterlegt ist. Das Verfahren unterteilt Schifffahrtswege (wie bei (Steidel et al. 2020)) in Sektoren und etabliert je Fahrtrichtung ein Modell des Normalverhaltens in Abhängigkeit von Kontextinformationen, wie z. B. Jahreszeiten, Schiffstypen und -größen und berechnet Wahrscheinlichkeitsverteilungen, mittels denen ermittelt werden kann, ob das Verhalten eines Schiffes in einem Sektor typisch ist oder ein auffälliges Verhalten darstellt. Zur Prüfung der KI-Verfahren wurden mit der Verkehrssimulation aus eMIR synthetisch erstellte Verkehrslagen generiert, sowie relevante Ereignisse in reale Verkehrslagen eingemischt.

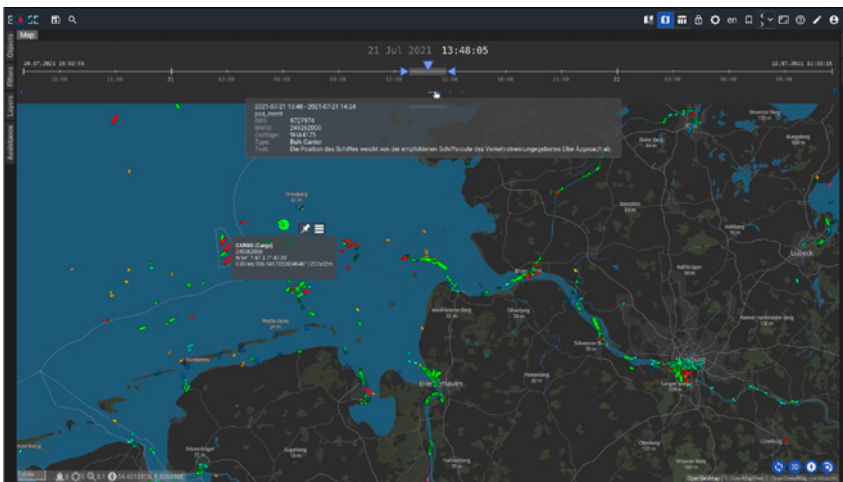


Abb. 5: Ereignisse

Welche Ereignisarten für den Ermittler von Interesse sind, hängt von der Art der Ermittlung ab. Um den Ermittler hier optimal zu unterstützen, werden die Ereignispunkte nach ihrer Art farblich markiert. So kann der Ermittler auch bei einer großen Anzahl von Ereignispunkten schnell die für ihn relevanten identifizieren. In der gesamten EASE-Software wurde darauf geachtet, dass der Nutzer möglichst schnell die für die jeweilige Aufgabe relevanten Informationen rein visuell extrahieren kann. Hierzu wird die Konekt-Methode nach (Harre et al. 2018) angewendet, die auf Basis einer Aufgabenanalyse Darstellungsvarianten hinsichtlich ihrer Eignung für die jeweilige Aufgabe bewertet.

6. UNTERSTÜTZUNG KOMPLEXER ARBEITSABLÄUFE DURCH ASSISTENZ

6.1. ASSISTENZFRAMEWORK UND VISUALISIERUNG

Das Assistenzsystem ist ein weiteres Kernelement des EASE-Bedienkonzeptes, mit dem komplexe Arbeitsabläufe in das EASE-System eingebunden werden. Anbietern von spezifischen Diensten oder Funktionen wird es ermöglicht, sich in das EASE-System zu integrieren (s. Abb. 6). Mögliche Assistenzfunktionen können die Anfrage von Erdbeobachtungsbildern, einer Driftsimulation oder der Unterstützung von verschachtelten Arbeitsabläufen sein. Das Prinzip wird im Folgenden anhand der Driftberechnung und den Workflows erläutert.

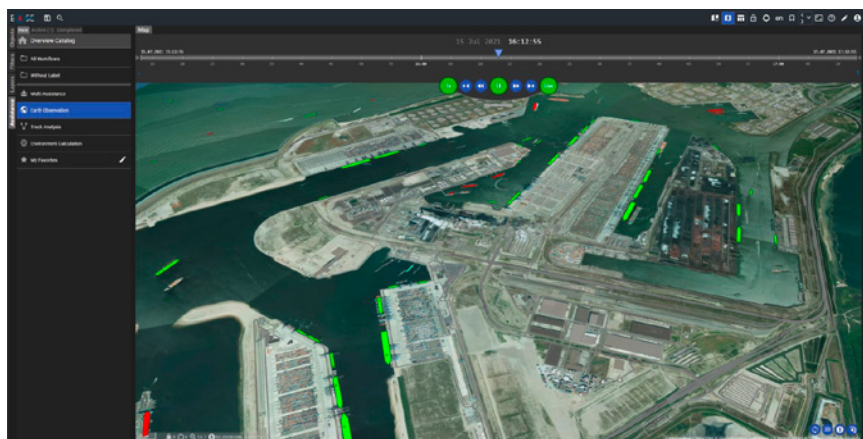


Abb. 6: Assistance.

6.2. DRIFT

Oft lassen sich Fragestellungen nicht mit einer einfachen Driftrechnung beantworten. Beispielsweise müssen Driftwege von mehreren Fundorten zeitlich rückwärts und von verschiedenen möglichen Verursachern zeitlich vorwärts simuliert werden. Die Integration des Drift-Services in das Assistenzframework erlaubt es dem Nutzer, die notwendigen Parameter für die Driftberechnung strukturiert zu übermitteln. Über eine direkte Interaktion mit der Kartenanwendung können etwa die Koordinaten eingegeben werden (s. Abb. 7).

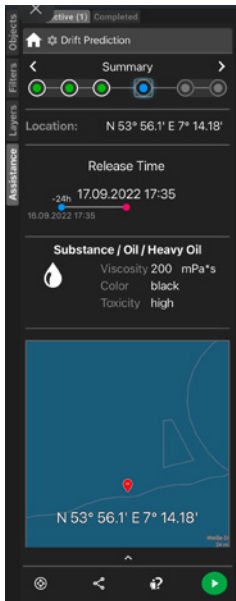


Abb. 7: Drift Assistance.

Das EASE-System kommuniziert dabei mit dem Driftservice am BSH. Die Darstellung der Drift in einer Karte mit den AIS-Daten ermöglicht eine schnellere Ermittlung als bisher (s. Abb. 8), da sowohl die Driftberechnung als auch die Übertragung der Ergebnisse optimiert wurden. Tests ergaben, dass eine einzelne Driftberechnung damit weniger als 10 %



Abb. 8: Drift Visualisierung: Der rote Punkt auf der Linie markiert die Position des Driftobjektes zu diesem Zeitpunkt. In blau ist der vergangene Driftweg und in grün der zukünftige dargestellt.

und der gesamte Ablauf (von dem Einstellen der Oberflächen bis zur Übermittlung eines geprüften Ergebnisses) nur etwa 33% der bisherigen Zeit benötigt. Die Zeitersparnis ermöglicht es ebenfalls ein Ensemble von Driftrechnungen mit Variation der Startzeit innerhalb kürzester Zeit zu erhalten und somit Unsicherheiten besser abzuschätzen.

6.3. UNTERSTÜTZUNG SCHWIERIGER ARBEITSABLÄUFE

Die Komplexität der Arbeitsabläufe steigt insbesondere, wenn viele unterschiedliche Arbeitsschritte durchgeführt werden müssen, um ein spezifisches Ziel zu erreichen. Ein einfacheres Beispiel ist die Ermittlung eines Verursachers bei einer Ölverschmutzung. Ein möglicher Weg den Verursacher zu ermitteln besteht darin,

- › die Driftbewegung der Verschmutzung durch eine Rückwärtssimulation zu ermitteln,
- › den Schiffsverkehr entlang der Driftbewegung zu identifizieren,
- › und die Schiffstypen herauszufiltern, die potentiell als Verursacher in Frage kommen.

Das Ergebnis ist eine Liste an potenziellen Verursachern (s. Abb. 9).

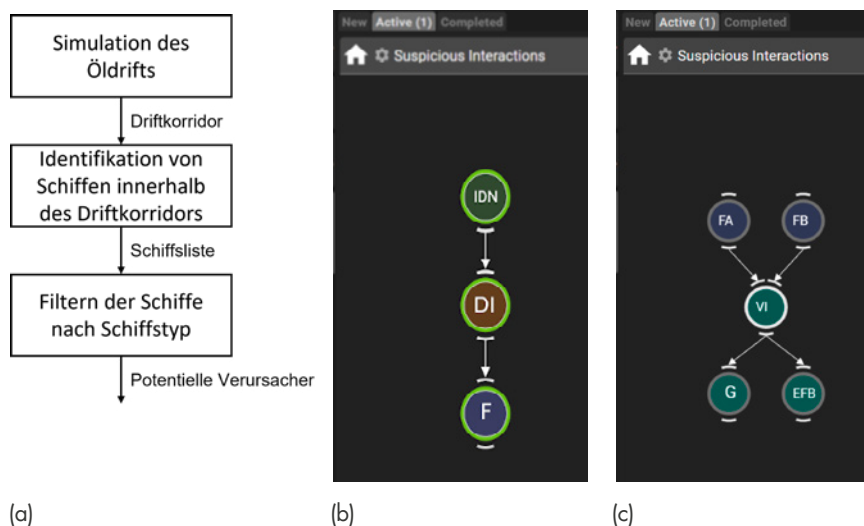


Abb. 9: Arbeitsablauf zur Verursacherermittlung bei einer Ölverschmutzung. (a) Logische Struktur des Arbeitsablaufs; (b) Darstellung in der UI; (c) Nebenläufige Arbeitsschritte.

Die EASE-Software enthält eine Workflow-Engine, die in der Lage ist Arbeitsabläufe dieser Art abzubilden. Sie ist dabei nicht auf vordefinierte Arbeitsabläufe beschränkt und lässt die Integration neuer Arbeitsabläufe zur Laufzeit zu. Hierbei wird spezifiziert, welche Funktionen benötigt werden und welche Ergebnisse als Eingabe einer anderen Funktion benötigt werden. Das Ergebnis ist ein azyklischer, gerichteter Graph (s. Abb. 9). Auf diese Weise sind die Ermittler in der Lage auf geänderte Rahmenbedingungen flexibel zu reagieren, indem sie die Beschreibung der Arbeitsabläufe entsprechend anpassen. Zudem kann

mittels eines Workflows die Expertise eines erfahrenen Ermittlers formalisiert und für neue Mitarbeiter verfügbar gemacht werden. Da die manuelle Übernahme von Ergebnissen eines Arbeitsschritts als Eingabe für den nächsten entfällt, reduziert sich der damit verbundene Arbeitsaufwand.

Für die jeweils aktuelle Ermittlungsaufgabe werden unterschiedliche Parametereingaben des Nutzers benötigt. Je nach formalisierter Arbeitsflussbeschreibung werden für jede Teilfunktion des Workflows beschriebene Eingabeseiten automatisch erstellt, durch die sich der Nutzer sequentiell durchnavigieren kann. Über eine Brotkrumenleiste über den Eingabeseiten, sieht der Nutzer, für welche Parameter Eingaben getätigt wurden. Auch hier ist das visuelle Konzept dieser Leiste über die Konekt-Methode erstellt worden. Die logische Struktur eines Workflows muss allerdings nicht rein sequentiell sein (s. Abb. 9 a und b), sondern kann auch parallele Arbeitsschritte enthalten, wie in Abb. 9 c dargestellt. Die Nutzerschnittstelle bietet zudem eine grafische Ansicht des Arbeitsablaufs (s. Abb. 9 b und c). Hier kann der Nutzer die logische Struktur erkennen, sehen für welche Funktionen noch Eingaben benötigt werden und welche Funktionen durch die Workflow-Engine bereits ausgeführt wurden oder in Ausführung sind, und sich Zwischenergebnisse anzeigen lassen.

Um Nutzern den Zugang zu komplexen Funktionen zu erleichtern, werden KI-Verfahren genutzt. Hierzu werden für jeden Workflow Bayes-Netze trainiert, die Parameter vorschlagen und dabei die Parameter berücksichtigen, für die schon Werte vom Nutzer gewählt wurden. Die vorgeschlagenen Werte ermöglichen es dem Nutzer seine Arbeit mit einem "Best-Guess" fortzusetzen und schnell zu ersten Ermittlungsergebnissen zu kommen. Zeitgleich kann er sich mit Experten (z.B. vom BSH) austauschen, um die vorgeschlagenen Parameter zu bestätigen oder zu korrigieren. Der Nutzer kann zudem auf der Bedienschnittstelle einsehen, wie sicher sich das System mit dem Vorschlag ist und welche anderen Optionen mit welchen Wahrscheinlichkeiten vorliegen (s. Abb. 10).

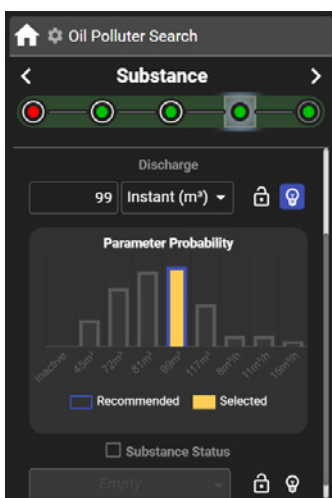


Abb. 10: Wahrscheinlichkeiten für verschiedenen Parameteroptionen.

In einer Vergleichsstudie haben sieben Versuchsteilnehmer das EASE-Workflowsystem verwendet, um zwei Anwendungsfälle zu bearbeiten, bei denen unterschiedliche Driftsimulationen durchgeführt werden mussten. Dieselben Anwendungsfälle wurden auch mit dem bestehenden SeaTrackWeb-System des BSH durchgeführt. Bei der Bearbeitungszeit zeigte sich für das EASE-Workflowsystem eine signifikante Reduzierung in der Bearbeitungszeit von durchschnittlich 28%.

7. FAZIT UND AUSBLICK

In dem sehr vielseitigen Projekt wurden die gesetzten Ziele erfolgreich adressiert. Das Bedienungskonzept (einfach, reaktiv und aufgabenangepasst) ermöglicht dem Nutzer komplexe Fragestellungen durch eine vollkommen neue, bedarfsgerechte Arbeitsweise effizient zu bearbeiten. Die im EASE-Projekt gewonnenen Erkenntnissen im Hinblick auf die speziellen Anforderungen der BOS der maritimen Sicherheit zeigen aber auch das weiterführende, darauf basierende Studien sinnvoll sind. Das Thema IT-Sicherheit vor Cyberangriffen und Manipulation von Daten, könnte in Hinblick auf die Operationalisierung beispielsweise in zukünftigen Projekten berücksichtigt werden.

Die Projektpartner sind dabei die erzielten Ergebnisse in ihren jeweiligen Organisationen nutzbar zu machen und diese zusätzlich auf andere Nutzungskontexte oder Geschäftsfelder auszuweiten. Das BSH ist bei dem Einsatz des Drift-Service auf behördliche und gesetzliche Aufgaben beschränkt und kann keinen kommerziellen Service anbieten.

An dieser Stelle möchten wir den Assoziierten Partnern aus dem MSZ herzlichen Dank aussprechen, ohne deren Beiträge aus Anwenderperspektive diese Ergebnisse nicht möglich gewesen wären, sowie bei Jakota, die dem Projekt Verkehrsdaten zur Verfügung gestellt haben.

LITERATUR

- [1] Blackler, Alethea; Popovic, Vesna; Lawry, Simon; Gudur, Raghavendra; Mahar, Doug; Kraal, Ben; Chamorro-Koc, Marianella (2011): Researching intuitive interaction. In: Diversity and unity: Proceedings of IASDR2011, the 4th World Conference on Design Research. Delft University of Technology, S. 1–12.
- [2] Harre, Marie-Christin; Feuerstack, Sebastian; Wortelen, Bertram (2018): A method for optimizing complex graphical interfaces for fast and correct perception of system states. In: International Conference on Human-Centred Software Engineering. Springer, S. 65–87.
- [3] Steidel, Matthias; Mentjes, Jan; Hahn, Axel (2020): Context-Sensitive Prediction of Vessel Behavior. In: Journal of Marine Science and Engineering 8 (12). DOI: 10.3390/jmse8120987.

METHMARE –

EMISSIONEN IN DER SCHIFFFAHRT MIT NEUARTIGEN GASMOTOREN VERRINGERN

AUTOREN

ANDREA PROSPERO

ROLLS-ROYCE SOLUTIONS GMBH

SIMON HETTIG

ROLLS-ROYCE SOLUTIONS GMBH

1. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Synthetische Kraftstoffe, die mithilfe erneuerbarer Energiequellen (EE) und nicht-fossilem Kohlenstoff hergestellt wurden, können einen wichtigen Beitrag zur raschen Umsetzung der maritimen Energiewende leisten. Im Fokus des Verbunds MethMare standen zwei technische Konzepte zur Vermeidung von Methanemissionen bei schnelllaufenden Großmotoren, die mit EE-Methan betrieben wurden. Auch der Einsatz von Methanol und Wasserstoff in Großmotoren wurde untersucht.

2. HINTEGRUND UND ZIELE

Ziel war es, Konzepte für Motoren zu entwickeln, die genauso leistungsstark, wie herkömmliche Schiffsmotoren sind, bei gleichzeitiger Senkung von klimaschädlichen Emissionen wie Kohlenstoffdioxid oder Methan. Der CO₂-Ausstoß von Gasmotoren ist gegenüber anderen Verbrennungsmotoren deutlich geringer. Allerdings wird Methan in bestimmten Lastbereichen (Teillastbetrieb und Beschleunigungsphasen) nicht vollständig verbrannt und ein Teil gelangt unverbrannt ins Abgas. Diesen sogenannten Methanschluß galt es zu reduzieren, da Methan wie auch CO₂ klimaschädlich ist. In den zum Schiffsantrieb bereits heute eingesetzten Gasmotoren wird als Brennstoff bislang verflüssigtes fossiles Erdgas (LNG) genutzt. Dieses kann Schritt für Schritt durch EE-Methan ersetzt und so die Energiewende in der Schifffahrt vorgebracht werden. Durch die in MethMare betrachteten Motorkonzepte werden deutlich sauberere Schiffsantriebe realisiert.

3. LÖSUNGSWEG

In MethMare wurden zwei Lösungsansätze für zukünftige Schiffsmotoren betrachtet. Beim Otto-Gas-Motorkonzept lag der Fokus auf dem Vor-Turbine-Methanoxidationskatalysator. Im Rahmen des Projekts sollte demonstriert werden, dass es geeignete Methankatalysatoren gibt, die auch eine für Schiffsantriebe ausreichende Langzeitstabilität aufweisen. Im Otto-Motorenkonzept wurde zusätzlich die Verbrennung von EE-Methanol am Einzylinder untersucht.

Beim Gas-Diesel-Motorkonzept lag der Fokus des Optimierungsansatzes auf Komponenten des Kraftstoff-Verbrennungssystems. Hier wurde mit Direkteinspritzung im Flex-Fuel-Verfahren der Methanschluß durch ein Hochdruck-Gassystem vermieden. Dabei wurde ein neuartiges High Pressure Dual Fuel (HPDF) Einspritzsystem mit einer dynamischen Hochdruck-Gasversorgung untersucht. Das flexible Konzept ermöglichte zudem den Einsatz verschiedener Kraftstoffe (Methan, Methanol, Wasserstoff).

4. ERGEBNISSE

Bei den experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Otto-Motorenkonzept lag der Fokus auf dem Langzeitverhalten des Methanoxidationskatalysators vor der Turbine (engl.: Pre-Turbo-Catalyst, PTC). Zur Beurteilung wurde die Abgasnachbehandlung vor der Turbine konstruktiv für die mobile und stationäre Motoranwendung betrachtet und für den Versuch am stationären Motor umgesetzt. Abb. 1 zeigt den vorgerüsteten Motor nach Integration des PTCs. Um die negativen Auswirkungen des Methankatalysators auf die Dynamik des Motors zu kompensieren, wurde der elektrisch unterstützte Abgasturbolader weiterentwickelt und auf dem Komponentenprüfstand erfolgreich verifiziert. Die anschließende analytische Bewertung des Transientverhaltens des mobilen Motors zeigte eine deutliche Steigerung der Dynamik, auch gegenüber einem herkömmlichen Dieselmotor.

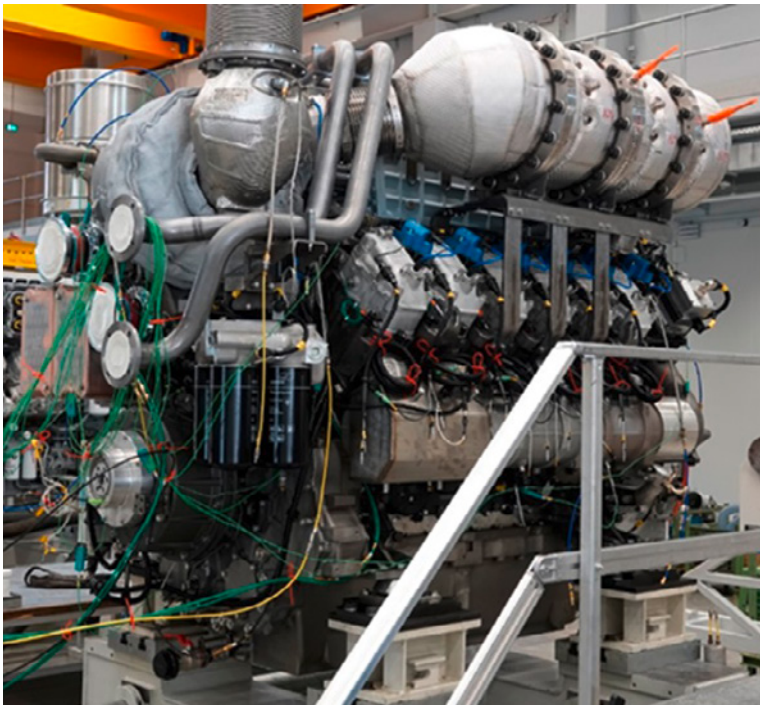


Abb. 1: Stationärerprobung mit PTC

4.1. OTTO-GAS-MOTORKONZEPT

Die experimentellen Untersuchungen des Methankatalysators am stationären Otto-Gas-Motor zeigten Methan-Umsatzraten im Nennlastpunkt von größer 98% im Neuzustand. Nach ca. 20-30 Stunden im stationären Betrieb nahm die Aktivität des Katalysators ab. Dieser Rückgang war auf eine Schwefelvergiftung zurückzuführen. Da der Motor im Versuch mit Erdgas aus dem Leitungsnetz betrieben wurde, ist davon auszugehen, dass der Schwefel zum größten Teil aus der Odorierung des Erdgases stammte. Da in der maritimen Anwendung EE-Methan bzw. Erdgas verflüssigt als LNG eingesetzt wird, ist schwefelhaltiges Erdgas jedoch nicht relevant. Der Versuch mit odoriertem Erdgas stellte eine Art Zeitraffer der Schwefelalterung dar. Die verbleibende Schwefelquelle war der Ölverbrauch des Motors. Um diesen zu reduzieren, stand die Optimierung des Tribosystems (Laufbuchse, Kolben und Kolbenringe) ebenfalls im Fokus der Untersuchungen. Mit einem neuartigen Tribosystem, das auf minimalen Ölverbrauch und Reibleistung optimiert ist, konnte eine verlängerte Stabilität der Umsatzrate des Katalysators erreicht werden.

Das PTC-Modell prognostizierte, dass eine annähernd vollständige Wiederherstellung der CH₄-Umsetzung im Fall einer Entschwefelung (Regeneration) möglich war. Experimentelle Untersuchungen an einem Synthesegas-Prüfstand mit real gealterten Katalysatorproben aus dem Vollmotorversuch zeigten, dass durch wiederholt kurzzeitiges „Anfetten“ der Verbrennung, der Katalysator nahezu vollständig vom Schwefel befreit und regeneriert werden konnte.

Da die CH₄-Umsatzfähigkeit des Katalysators von der Abgastemperatur beeinflusst wird, ist die mittlere Umsatzrate in einem transienten Zyklus von dessen Fahrprofil abhängig. Ergebnisse aus den Transient-Modellrechnungen zeigten am Beispiel einer Fähre mit einer mittleren Auslastung von 45% eine mittlere CH₄-Umsatzrate nach 8.000 Stunden von 51% ohne Regeneration. Mit erfolgreicher Regeneration kann eine Umsatzrate von über 80% nach 8.000 Stunden erreicht werden.

Für das Otto-Motorenkonzept wurden auch erste Versuche mit Verbrennung von Methanol in einem Magergaskonzept am Einzylinder durchgeführt. Die Versuche mussten mit Experimentalinjektoren durchgeführt werden, da am Markt aktuell keine Methanolinjektoren für die hier betrachtete Motorengröße BR4000 zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse zeigten, dass auch ohne eine selektive katalytische Reduktion (SCR), niedrige Stickoxidwerte erreicht werden (unter dem IMO II sowie EU Stage V Emissionsgrenzwert). Um hohe Leistungsdichten verlässlich darzustellen, müssen jedoch geeignete Einspritzsysteme entwickelt und die Gemischaufbereitung optimiert werden.

4.2. GAS-DIESEL-MOTORKONZEPT MIT HIGH PRESSURE DUAL FUEL EINSPRITZSYSTEM

Beim Gas-Diesel-Motorkonzept wurde Diesel als Zündkraftstoff und EE-Methan als Hauptkraftstoff verwendet. Bei diesem Brennverfahren lassen sich die Vorteile eines Dieselmotors, wie hohe Leistungsdichte, hohe Wirkungsgrade und schnelles Dynamikverhalten,

sehr gut mit der CO₂-armen Verbrennung von Erdgas bzw. EE-Methan kombinieren. Herzstück des Brennverfahrens ist der High Pressure Dual Fuel (HPDF) Injektor für synthetische Kraftstoffe (s. Abb. 2).



Abb. 2: High Pressure Dual Fuel (HPDF) - Injektor

Durch CFD-Berechnungen und Versuchen am optischen Einzylindermotor wurden verschiedene Varianten von Einspritzgeometrien in Kombination mit verschiedenen Kolbenmulden, untersucht und optimiert. Es wurde gezeigt, dass die Treibhausgasemissionen um 24% gegenüber heutigen Dieselmotoranwendungen in der Schifffahrt (im E3 Zyklus, Tankto-Wake) bei vergleichbarem Dynamikverhalten reduziert werden können (s. Abb. 3). Durch das innovative Brennverfahren wurde zudem der Methanschluß auf vernachlässigbar niedrige Werte von unter 0,2 g/kWh reduziert.

Die Wirkungsgrade des innovativen Gas-Diesel-Motors sind vergleichbar mit denen eines herkömmlichen Dieselmotors. Ein Grund ist der hohe Druck von bis zu 500 bar, mit dem das Methangas in den Brennraum eingespritzt wird. Um diese hohen Drücke in einer dynamischen Anwendung bereitzustellen, wurde ein Hochdruck-Gassystem als Demonstrator erfolgreich realisiert und an mehreren hochdynamischen Betriebsprofilen erprobt.

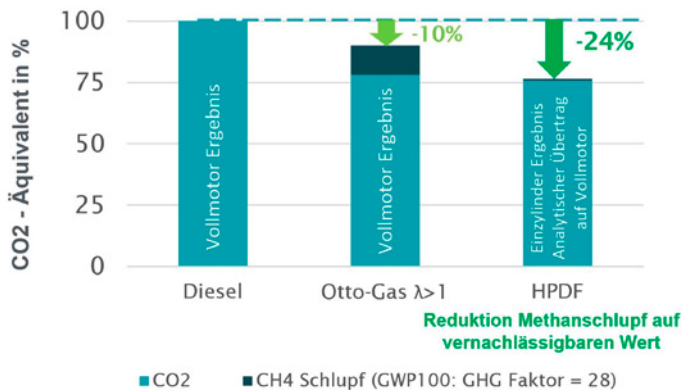


Abb. 3: Reduktion von Treibhausgasemissionen durch HPDF-Brennverfahren und Kraftstoffwechsel

Im geplanten Nachfolgeprojekt wird die Entwicklung von sauberen Methanol-Motoren für die maritime Anwendung vorangetrieben. Dadurch wollen die Partner die Einführung von EE-Methanol als Kraftstoff für Küsten- und Binnenschiffe erleichtern. Hierzu sollen verschiedene Methanol-Verbrennungskonzepte für schnelllaufende Motoren entwickelt, erprobt und bewertet werden. Dazu gehört auch die Entwicklung eines für Methanol geeigneten Einspritzsystems.

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER 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. Pillar 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

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. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN
Tagungsband der Statustagung 2022 (2022), 285 Seiten
ISBN 978-3-95806-673-1