



# STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2021

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

#### Herausgeber und Vertrieb

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

#### Satz und Layout

Projektträger Jülich

#### Bildnachweis

© SIEM Offshore

Schriftenreihe Projektträger Jülich  
ISBN 978-3-95806-594-9

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

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

# **STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN**

TAGUNGSBAND DER STATUSTAGUNG 2021

SCHRIFTENREIHE PROJEKTRÄGER JÜLICH



## VORWORT

Die maritime Wirtschaft, eine Schlüsselbranche für Deutschland, steht aktuell vor gewaltigen Herausforderungen. Es gilt, die Corona-Folgen zu bewältigen und gleichzeitig die maritime Energiewende weiter voranzutreiben. Die Themen Klimaschutz und Nachhaltigkeit spielen neben Sicherheit und Digitalisierung eine immer größere Rolle und sind in der Maritimen Forschungsstrategie 2025 der Bundesregierung fest verankert.

Das Programm der Statustagung „Maritime Technologien“, erstmals im digitalen Format, spiegelt die Visionen und Anstrengungen der Branche wider, Klimaschutz durch umweltfreundliche Kraftstoffe und Anpassung bestehender Technologien umzusetzen.

Die Digitalisierung wird immer stärker zum Treiber der maritimen Produktion und ist die Basis für innovative Sicherheitstechnologien. In der Meerestechnik konnten im Jahr 2021 gleich zwei Großprojekte gestartet werden, welche die deutschen Systemintegratoren und deren Zulieferer für Unterwassertechnologien deutlich stärken.

Mit den Vorträgen zur Konferenz, aber auch den Beiträgen im Tagungsband werden die große Bandbreite und Ergebnisse der maritimen Forschungsförderung des BMWi präsentiert. Die Statustagung beleuchtet aktuelle Projekte, den Transfer in die Praxis und gewährt einen Ausblick auf zentrale Herausforderungen der Zukunft.



# INHALTSVERZEICHNIS

## **MarGet**

15

Leistungsfähigere Komponenten für Schiffsgetriebe durch  
Ressourcen- und umweltschonende umformende Fertigungsstrategien

DR.-ING. UDO HELFRITZSCH

DIPL.-ING. (FH) MIKE POPP

PROF. DR. SC. TECHN. MICHAEL SCHNEEWEISS

DR.-ING. JAN GLÜHMANN

DIPL.-ING. (BA) DOMINIK RHEIN

DR.-ING. STEPHAN BATT

## **ETA-UP**

33

Steigerung des Gesamtnutzungsgrads und Reduzierung  
der Reibverluste am mittelschnelllaufenden Schiffsmotor

DIPL.-ING. MARKO PÜSCHEL

DIPL.-ING. THOMAS SADLOWSKI

DR.-ING. MARTIN REISSIG

M. SC. ALEXANDER DOTTEI

## **LEDF 2-KONZEPTE**

49

Low Emission Dual Fuel-Konzepte 2:  
Adaptive Brennverfahrenskonzepte für effiziente und emissionsarme  
Schiffsdieselmotoren bei Einsatz stark variierender Brenngase

M. SC. SEBASTIAN CEPELAK

PROF. DR. BERT BUCHHOLZ

DR.-ING. SASCHA ANDREE

DIPL.-ING. KARSTEN SCHLEEF

M. SC. BJÖRN HENKE

## **MUM**

67

Erarbeitung einer meeres-technischen Systemlösung  
für autonome Unterwasser-Arbeiten

JÖRG KALWA

DR. RAMONA STACH

DR. RUDOLF BANNASCH  
DR. EUGEN OLENEW  
WILLEM HENDRIK WEHNER  
NICOLAS RICHTER  
MATTHIAS GOLZ  
SEBASTIAN RITZ  
PROF. DR. GERD HOLBACH  
DR. MARTIN KUROWSKI  
ERIK RENTZOW  
PROF. DR. TORSTEN JEINSCH

### **INNO-Emaille**

77

Emailbeschichtung auf maritimen Fahrzeugen und Ausrüstungsgegenständen und auf stationären Maritimobjekten im Unterwasser- und Decksbereich durch induktives Aufschmelzen und Einbrennen

CARSTEN PAULS  
MICHAEL FUNKE  
BERND MARYNIAK

### **REMOTEDTECT**

89

Eine drahtlos betreibbare Manschettentechnologie für die Zustandsüberwachung von Gründungsstrukturen mittels geführter elastischer Wellen

DIPL.-ING. FRIEDRICH VON DUNGERN  
DR. RER. NAT. BIANCA WEIHNACHT  
DIPL.-ING. (SFI) TOBIAS GAUL  
DR.-ING. TIMO SCHOLEHWAR

### **HiOcav**

95

Verbesserte Prognose der druch die Wechselwirkung zwischen Schicht und Spitzenwirbelkavitation bedingten Druckschwankungen höherer Ordnung

DR.-ING. MARTIN GREVE  
DIPL.-ING. HANS-JÜRGEN  
M.SC. RHENA KLOSE  
M.SC. ROLAND GOSDA  
DIPL.-ING. KEQI WANG



PROF. DR.-ING. MOUSTAFA ABDEL-MAKSOUND  
PROF. DR.-ING.  
NILS DAMASCHKE  
DR.-ING. ERIC EBERT  
PROF. DR.-ING. SASCHA SPORS  
DR.-ING. FRANK PAPENFUSS  
DIPL.-ING. WITHOLD DRAZYK  
DIPL.-ING. LUTZ KLEINSORGE  
M.ENG. BENJAMIN KLEMSTEIN

## **ESD@SEA**

119

Entwurf von Propulsionsverbessernden Maßnahmen bei Betriebsbedingungen

PROF. DR.-ING. STEFAN KRÜGER  
BJÖRN CARSTENSEN  
JOHANNES WILL  
FRAHAN MATIN  
LUTZ KLEINSORGE  
RAINER GRABERT

## **WASSER**

133

Wartung und Service von Schiffen mit erweiterter Realität

DR.ING. AXEL FRIEDEWALD  
ROBERT ROST  
NIKOLAJ MELUZOV  
PROF. DR.-ING. HABIL HERMANN LÖDDING  
TOBIAS KNÖDLER  
DR.-ING. JÖRG PESCHKE  
TOBIAS DOMBROWSKI

## **querEVA**

147

Bedarfsgerechte Querstrahlanlagen –  
Entwicklung und Validierung einer Auslegungsmethodik

LARS KOOPMANN  
MAXIM BRADE

JOHANNES MERSMANN  
BARBARA BLUM  
JÖRN HINNENTHAL  
YANNICK EBERHARD  
ANDRÉS CURA HOCHBAUM  
JOHANNES SCHWARZ-BEUTEL

## **LOMA**

163

Lagebildoptimierung für maritime Awareness

DR. MARTINA BRÖTJE  
ANASTASIA SCHWARZE  
FLORIAN MOTZ  
DR.-ING. JERONIMO DZAACK  
THORSTEN THOMAS  
DANIEL TIETJEN

## **GKOM 2020**

177

Innovative Brennraumkomponenten für Großmotoren im maritimen Bereich

DIPL.-ING. PETER KOLBE  
CHRISTIAN KUHN  
PROF. DR.-ING. HABIL. SIEGFRIED BLUDSZUWEIT  
ENRICO ROTHE  
DIPL.-ING. HENDRIK SPECHT  
DIPL.-ING. ANDRE WAGNER  
DIPL.-ING. TIM LEHNERT  
PROF. LUTZ KRÜGER  
DR. ANDREAS KESSLER

## **EHCR-BOOST**

193

Kompakt vernetzte Mehrphasentransportsysteme mit neuen Casinggas  
Kompressoren zur Erhöhung der Ausförderrate maritimer Öl- und Gasfelder

MARK REICHWAGE  
JENS-UWE BRANDT

DR. ABDULMALIK ALWAN  
MILAN PESCHKES  
LUCAS BAUMEISTER  
PROF. HANS HOFFMEISTER  
PROF. ANDREA LUKE  
MARIAN LOTTIS  
MOHAMMAD DEEB

## **ACTRESS**

211

Architecture and Technology Development Platform  
for Realtime Safe and Secure Systems

AXEL HAHN  
ANDRÉ BOLLES  
ARNOLD AKKERMANN  
ALEXANDER STAVENHAGEN  
PETER DUGGE  
BENJAMIN LEHMANN  
BENJAMIN LEIPOLD  
WILKO BRUHN  
WIGAND GRAFE  
CLAUS-HENNING FRIEDRICHS  
JAN BARNICKEL  
DOREEN THOMA  
DANIEL MEYSZIES  
KARL-HEINZ WARNSTEDT  
MARTIN ULMKE  
MARTINA BRÖTJE  
CHRISTIAN HEMMINGHAUS

## **KAV4D**

231

Numerische Vorhersage des zeitlichen Verlaufs kavitationsbedingter  
Erosionsschäden an Schiffspropulsions- und -manövrierorganen

DR.-ING. ANDREAS PETERS  
PROF. DR.-ING. ROMUALD SKODA  
FELIX SCHREINER  
TUNG NGUYEN  
LUTZ KLEINSORGE

PROF. DR.-ING. BETTAR O. EL MOCTAR  
YOUJUN YANG  
HAUKE BAUMFALK  
JÖRN KLÜSS  
MICHAEL PALM

## **PRS GYRO**

Public regulated Service Gyro

247

DIRK KOWALEWSKI  
DR. ERTAN GÖKLÜ  
PRIYANKA PRIADARSHINI  
RAZA JAVED  
DR. ULRICH MANGOLD

## **DIGITALE KÜSTE**

Roadmap und Handlungsempfehlungen  
zu Innovationen für den maritimen Standort Deutschland

263

MATTHIAS STEIDEL  
PROF. DR.-ING. AXEL HAHN  
ALEXANDER NIES  
PD DR. ALEXANDER WEIß  
PROF. DR. GARY SCHAAL

## **ISYSTEM4EFUELS**

Intelligentes System für den Einsatz strombasierter Kraftstoffe

273

EMANUEL RAUER  
MATTHIAS WIELAND  
ANDREAS SCHMIDT  
BENJAMIN STENGEL  
DR.-ING. FABIAN PINKERT  
ERWIN SWIDERSKI  
BOYU YANG





# MarGet –

LEISTUNGSFÄHIGERE KOMPONENTEN FÜR SCHIFFSGETRIEBE DURCH RESSOURCEN-  
UND UMWELTSCHONENDE UMFORMENDE FERTIGUNGSSTRATEGIEN

## AUTOREN

<b>DR.-ING. UDO HELLFRITZSCH</b>	IWU CHEMNITZ
<b>DIPL.-ING. (FH) MIKE POPP</b>	IWU CHEMNITZ
<b>PROF. DR. SC. TECHN. MICHAEL SCHNEEWEISS</b>	WESTSÄCHSISCHE HOCHSCHULE ZWICKAU
<b>DR.-ING. JAN GLÜHMANN</b>	WESTSÄCHSISCHE HOCHSCHULE ZWICKAU
<b>DIPL.-ING. (BA) DOMINIK RHEIN</b>	DREILING MASCHINENBAU GMBH, GEISLEIDEN
<b>DR.-ING. STEPHAN BATT</b>	FLENDER GMBH

## 1. MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG

Die Schiffsindustrie verwendet leistungsstarke Getriebe und Zahnräder in einer Vielzahl von Seefahrzeugen. Im Allgemeinen sind diese Getriebe wesentlich leistungsfähiger als solche, die nicht für die Schifffahrt eingesetzt werden und sind in unterschiedlichsten Konfigurationen und Ausführungen verfügbar. Die perspektivischen Herausforderungen für die Fertigung solcher maritimen Systeme bestehen neben der Produktivitätssteigerung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, in der Erhöhung von Sicherheit und Effizienz in der Schifffahrt und vor allem in der Schaffung technisch überlegener Produkte in immer kürzeren Innovationszyklen.

Durch die Weiterentwicklung des Verfahrens Bohrungsdrücken wird die technologische Basis für die Realisierung einer neuen, flexiblen Produktionstechnik zur energie- und materialeffizienten Fertigung von Schiffsgetriebewellen bereitgestellt. Bisher ist die Herstellung hohlgeformter Bauteile mittels umformtechnischer Verfahren im geforderten Abmessungsbereich ausschließlich auf Großanlagen der Stahlindustrie nur in hohen Stückzahlen möglich. Bei der Klein- und Mittelserienfertigung von Großtriebekomponenten dominieren spangebende Herstellungsverfahren, mit höherem Werkstoffverlust. Das Konsortium beschäftigte sich mit den folgenden Aufgabenbereichen:

- › Produktanalyse für Marinebauteile und Ermittlung von Materialkennwerten (Flender GmbH)
- › Anlagenkonstruktion, -fertigung, -aufbau und -inbetriebnahme (Dreiling Maschinenbau GmbH).

- › Entwicklung der Warmzerspannungstechnologie (FH Zwickau)
- › Machbarkeitsanalyse für Bauteilportfolio, theoretische und experimentelle Technologieentwicklung und Erstellung des Lastenheftes für die Bohrungsdrückanlage (Fraunhofer IWU)

Die Entwicklung eines Verfahrens sowie der entsprechenden Anlagentechnik zur umformenden Hohlformerzeugung für Großbauteile erfolgt in einem dreistufigen Entwicklungsprozess (Abb. 1).



Abb. 1: Entwicklungsprozess Bohrungsdrücken

Der derzeitige Forschungsstand zum Bohrungsdrücken beschränkt sich derzeit auf Pkw-typische Bauteilabmessungen [1] [2]. Als Alternative zum Tieflochbohren verzichtet dieses Verfahren weitgehend auf zusätzliche Schmier- und Trennmittel und ist somit umweltverträglicher. Erstmals wurde die Verfahrensidee des Bohrungsdrückens und dessen technische Umsetzung von Weißbach und Herold [3]; [4] beschrieben. Das Verfahrensprinzip stellt Abb. 2 dar.

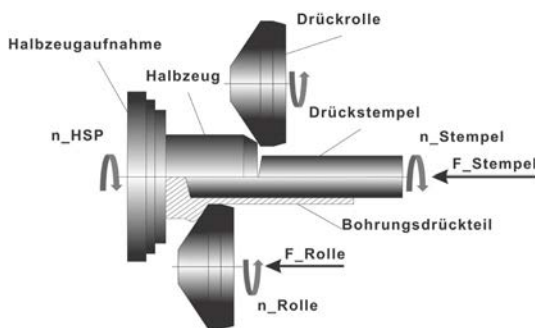


Abb. 2: Verfahrensprinzip Bohrungsdrücken

Durch die partiellen Druckwirkungen der am Außenmantel des Rohteiles abwälzenden Drückrollen und einem gleichzeitig axial arbeitenden Formstempel wird die Hohlform dadurch erzeugt, dass der durch diese Werkzeugelemente verdrängte Werkstoff axial abfließt und eine Napfwand ausbildet. Im Allgemeinen wird das Halbzeug rotierend



angetrieben. Der Formstempel führt eine axiale Vorschubbewegung aus und kann entweder freilaufend gelagert sein oder wird gleichsinnig drehend zum Halbzeug angetrieben. Der beim Eindringen des Stempels radial verdrängte Werkstoff wird durch die Drückrollen axial umgelenkt und fließt entgegen der Vorschubrichtung des Stempels. Nach dem abgeschlossenen Bohrungsdrückvorgang werden die Rollen sowie der Stempel in ihre Ausgangsposition verfahren. Bleiben dabei die Rollen zugestellt, führt diese rückwärtige Verfahrbewegung bei rotierender Spindel zum Abstrecken der Hohlteilwand und bewirkt ein Verlängern des Werkstückes. Dadurch wird eine Verbesserung der Masseverteilung der Hohlwelle durch Reduzierung bestehender Wanddickenunterschiede erreicht.

## 2. UMFORMTECHNOLOGIE BOHRUNGSDRÜCKEN

### 2.1 TECHNOLOGIE- UND ANLAGENKONZEPT

Ausgangspunkt der Technologieentwicklung war eine umfassende Analyse des Bauteilsegmentes im Bereich der maritimen Getriebewellenfertigung, bei der die Nutzung der neuen Produktionstechnik geprüft und eine Klassifizierung hinsichtlich verfahrensrelevanter geometrischer Merkmale vorgenommen wurde. Im Ergebnis konnten mehr als 200 Bauteile erfasst werden, für die das Bohrungsdrücken eine aussichtsreiche Fertigungsalternative darstellt. Das perspektivische Produktsortiment wird dabei durch folgende geometrischen Bauteilgrundformen bestimmt: Radkörper-, Flansch- u. Rohrwelle. Insbesondere mit Blick auf die Entwicklung der Bohrungsdrückanlage bestand die Aufgabe der Portfolioanalyse darin, die Bauteilgrenzabmessung sowie das zukünftig zu bearbeitende Werkstoffspektrum zu definieren. Demnach war bei der Prozess- und Anlagendimensionierung ein maximal bearbeitbarer Durchmesser von 600 mm sowie eine maximale Bauteillänge von 2225 mm zu berücksichtigen.

Mit den Demonstratoren „Stirnradwalze“ und „Hohlwelle“ wurden Repräsentanten für die zwei Bearbeitungsstrategien Stangen- und Zweiseitenbearbeitung gewählt, bei denen das Bohrungsdrücken als Substitutionslösung für Zerspanungsprozesse in einem erweiterten Abmessungsbereich Anwendung findet (siehe Tab. 1). Neben einer Werkstoffeinsparung von bis zu 35 Prozent wird zudem die Möglichkeit der Umsetzung des Leichtbaus aufgezeigt.

Tab. 1: Grenzabmessung Bohrungsdrücken: gewählte Demonstratoren vs. Stand der Technik

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>A/B</b>
	<b>Demonstratoren</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>Erweiterungsfaktor</b>
Halbzeuggdurchmesser	356–440 mm	<75 mm	6
Fertigteildurchmesser	306–360 mm	30–70 mm	5
Innendurchmesser	136–180 mm	25–45 mm	4

Den technischen Fortschritt der Entwicklung verdeutlicht die Abb. 3. Die bisherigen Verfahrensgrenzen des Bohrungsdrückens für technologierelevante Parameter sind innerhalb

der Säulendiagrammdarstellung dem Faktor 1 zugeordnet. Die Verfahrenserweiterung als Grad des technischen Fortschritts entspricht demnach für den maximal herstellbaren Durchmesser einer sechzehnfachen Vergrößerung gegenüber dem Stand der Technik. Die farbliche Einteilung der Anwendungsbereiche Schiff- und Fahrzeugbau geben zudem eine Orientierung zu den Größenverhältnissen der Bauteile und zeigen die branchenübergreifende Signalwirkung der Entwicklung.

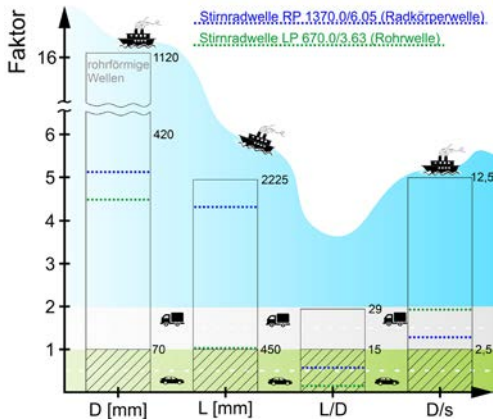


Abb. 3: Verfahrensgrenzen des Bohrungsdrückens im Vergleich zum Stand der Technik  
 D - Durchmesser; L - Länge, LB/DB - Länge zu Durchmesser beim Bohrungsdrücken;  
 DB/sB - Durchmesser zu Wanddicke beim Bohrungsdrücken

## 2.2 UNTERSUCHUNGEN ZUR ANLAGENDIMENSIONIERUNG - BOHRUNGSDRÜCKEN

Neben der geometrischen Dimensionierung der Anlage anhand des anvisierten Produktspektrums erfolgte auch die Ermittlung der notwendigen Leistungsparameter. Dies erforderte zunächst analytische Berechnungen der Prozesskräfte, Momente, Drehzahlen und Vorschübe gemäß [3], [4].

Zur Absicherung der prognostizierten Leistungsdaten wurden auf der vorhandenen Bohrungsdrückanlage skalierte Versuche nach den Regeln der Ähnlichkeitsmechanik durchgeführt und eine Skalierungsvorschrift zur Extrapolation der Prozesskräfte auf die realen Abmessungen erarbeitet [5].

Als Versuchsgeometrie diente eine Welle mit den in Abb. 4 gezeigten Hauptabmessungen. Die Skalierung wurde so gewählt, dass der Leistungs- und Abmessungsbereich der zur Verfügung stehenden Versuchsanlage BDM 2000 eingehalten wurde. Bzgl. des realisierbaren Rollendurchmessers ergab sich der Skalierungsfaktor für Längenmaße von  $\lambda_s = 4,35$ .

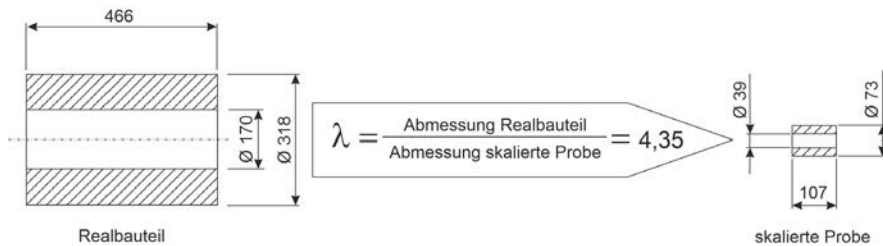


Abb. 4: Geometrische Skalierung der Versuchsgeometrie

Dieser geometrische Skalierungsfaktor führt dazu, dass resultierende Kräfte mit dem Faktor  $\lambda_s^2 = 18,9$  und Momente mit  $\lambda_s^3 = 82,19$  zu berechnen sind. Von der Geometrie unabhängige Größen wie Temperatur, Rollenstellwinkel und Umfangsgeschwindigkeit werden nicht skaliert. Die Ergebnisse wurden zur Quantifizierung der Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage genutzt. Die experimentelle Erprobung erfolgte anhand eines statistischen zentral zusammengesetzten Central Composite Inscribed - CCI Versuchsplanes, der auch quadratische oder kubische Zusammenhänge erkennen lässt. Als Variationsparameter und deren Einflüsse auf die Kräfte und Momente dienten Halbzugdurchmesser, radiale Eindringtiefe, Rollenstellwinkel, Starttemperatur, Spindeldrehzahl und bezogener Vorschub. Der Versuchsstand für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen bestand neben der Bohrungsdruckmaschine BDM 2000 aus einer induktiven Erwärmungsanlage inklusive Kühlaggregat, einem Analysegerät zur Aufzeichnung der Prozessdaten sowie einem Handlingsystem für den Transport der erwärmten Halbzeuge vom Induktor zum Spannfutter der Anlage, siehe Abb. 5.

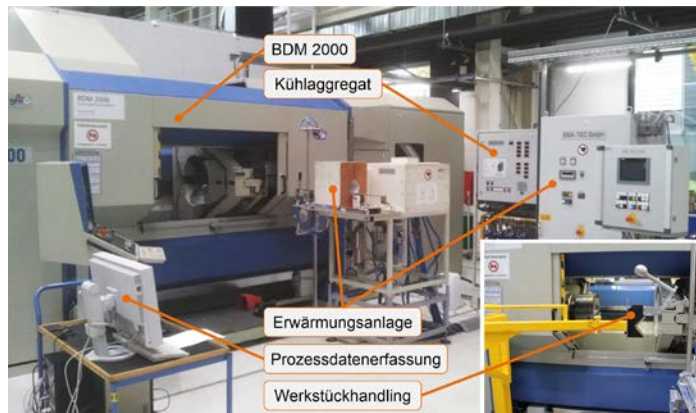


Abb. 5: Versuchsstand Bohrungsdrücken

In der Versuchsauswertung konnten die Parametereinflüsse auf die Prozesskräfte rechnerisch mittels quadratischer Regression bestimmt werden. Die Abb. 6 zeigt ermittelte Wirkzusammenhänge in einer qualitativen Darstellung (links). Dabei verdeutlichen die Pfeile in Richtung und Größe die Stärke des Einflusses der aufgeführten Prozessparameter auf

die axiale Rollenkraft  $F_a$ , die radiale Rollenkraft  $F_r$ , die Stempelkraft  $F_s$  sowie das Drehmoment der Hauptspindel  $M_d$ . Die rechte Darstellung zeigt das Ergebnis der Regressionsrechnung am Beispiel der Stempelkraft mit den Einflussfaktoren Starttemperatur und Rollenanstellwinkel.

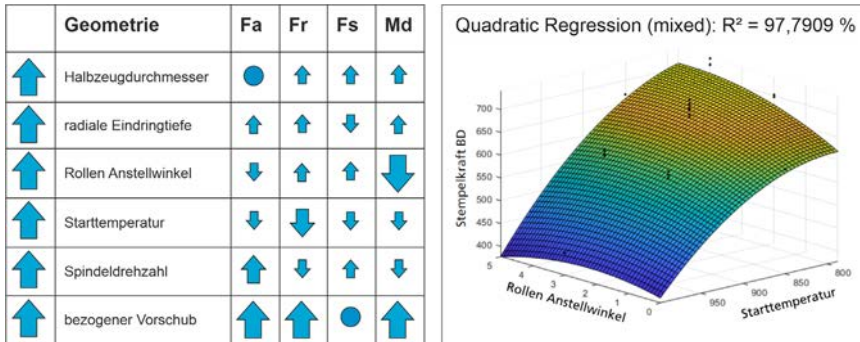


Abb. 6: Zusammenfassung Parametereinflüsse links, Stempelkraft rechts

### 2.3 ENTWICKLUNG WARMZERSPANUNGSTECHNOLOGIE

Innerhalb der neuen Prozesskette kann nicht vollkommen auf die spanende Bearbeitung verzichtet werden. Für den Bohrungsdrückprozess ist eine stirnseitige Vorbearbeitung des Rohmaterials erforderlich, um den Drückstempel zu zentrieren. Weiterhin ist nach dem Drückprozess die Vorform vom Stangenmaterial zu trennen. Zur Gestaltung einer effizienten Prozesskette bietet es sich an, diese Zerspanungsoperationen in der Bohrungsdrückmaschine bei Umformtemperaturen bis zu  $1000\text{ °C}$  auszuführen. Die abschließende Fertigbearbeitung wird wie bisher auf separaten Maschinen bei Raumtemperatur ausgeführt. Aus der vorliegenden, neuen Prozesskette zur Getriebeholwellenfertigung, ergeben sich zwei grundlegende, spanungstechnische Problemstellungen. Zum einen ist zu klären, wie die spanende Bearbeitung bei Umformtemperatur ( $> 500\text{ °C}$ ) wirtschaftlich realisiert werden kann und zum anderen, welche Anforderungen sich aus den veränderten Bauteileigenschaften nach dem Bohrungsdrücken für die spanende Fertigbearbeitung ergeben. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden Grundlagenuntersuchungen zur Warmzerspanung bis  $950\text{ °C}$  im Labormaßstab und Zerspanungsversuche an bohrungsgedrückten Werkstücken aus dem Werkstoff 18CrNiMo7-6 (1.6587), die bei einer Temperatur von ca.  $1000\text{ °C}$  umgeformt wurden, durchgeführt [6]. Wesentliche Ergebnisse der im Vorhaben durchgeführten Analysen sind neuartige, experimentell abgesicherte Aussagen zu:

- › Spanbildung, Werkzeugverschleiß und Zerspankraft unter den Bedingungen der Warmzerspanung (speziell beim Drehen und Fräsen von Stahlteilen bis  $950\text{ °C}$ ),
- › Warmzerspanungstechnologien zum Vorbearbeiten der Rohteile sowie zum Ablängen der umgeformten Rohteile im erhitzten Zustand,

- › Anforderungen an eine Zerspanungseinheit zur Integration in das neuartige Umformmaschinenkonzept,
- › Spanbarkeit inkrementell umgeformter Bauteile.

Auszugsweise zeigt Abb. 7 die bisher nicht bekannte Abhängigkeit des Hauptwertes der spezifischen Schnittkraft  $k_{c1.1}$  von der Werkstücktemperatur bis 950 °C. Deren Kenntnis ist unabdingbar für die exakte Vorausberechnung der auftretenden Spanungskräfte bei der Warmzerspanung und ist die Voraussetzung für eine Maschinendimensionierung und Prozessgestaltung.

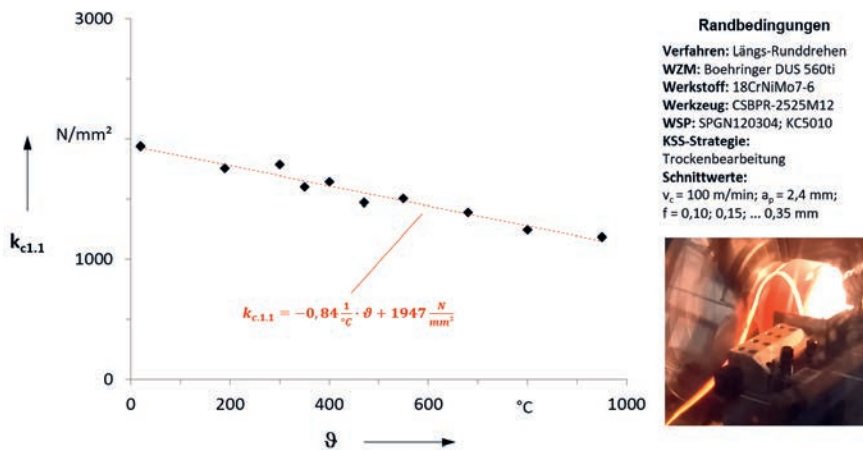


Abb. 7: Hauptwert der spezifischen Schnittkraft in Abhängigkeit der Werkstücktemperatur

### 3. KONSTRUKTION UND BAU DER BOHRUNGSDRÜCKANLAGE FÜR WELLEN IM MARITIMEN SEKTOR

Die Aufgabe des Sondermaschinenbauers Dreiling Maschinenbau GmbH war die Umsetzung der Technologiedaten in eine innovative Versuchsanlage. Das Teilprojekt beinhaltete die Anlagenkonstruktion, -fertigung und -montage, die Dimensionierung und Beschaffung der Nebenaggregate, sowie die Inbetriebnahme der Versuchseinrichtung und die Schaffung der Schnittstellen für das Prozessmonitoring.

#### 3.1 MASCHINENKONZEPT DER BOHRUNGSDRÜCKANLAGE

Basierend auf den Anforderungen des durch das Fraunhofer IWU erarbeiteten Lastenhefts wurde mit allen Projektpartnern das Maschinenkonzept der Bohrungsdrückanlage (BDA) entwickelt. Der wesentliche Unterschied zum derzeitigen Forschungsstand besteht in den größeren Bauteilabmessungen (Faktor 7–10) mit adäquaten Maschinendimensionen.

Die Abb. 8 zeigt den schematischen Maschinenaufbau der BDA:

1. Bauteil
2. Induktionserwärmungsanlage
3. Zerspanungseinheit
4. Spannsystem
5. Walzsupport
6. Stempelsupport
7. Hydraulischer Achsantrieb
8. Maschinenverkleidung
9. Sprühkühlsystem
10. Maschinenkühlung
11. Aerosolabscheider
12. Steuerung

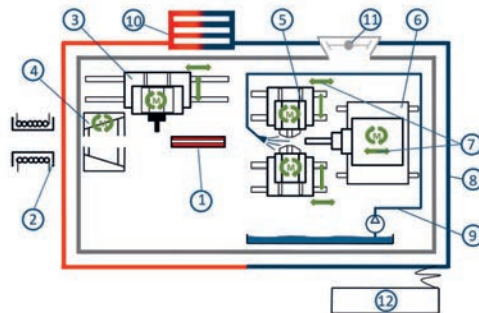


Abb. 8: Maschinenkonzept der Bohrungsdrückanlage (BDA)

Das Konzept sieht vor, das Bauteil (1) außerhalb der Maschine durch einen Induktor (2) auf ca. 1000 °C zu erwärmen und per Kran in die Maschine zu transportieren. Das im Spannsystem (4) aufgenommene glühende Werkstück wird rotatorisch angetrieben und mit Hilfe der axial bewegten Walzrollen- (5) und Stempelsupporte (6) durch die elektrohydraulisch angetriebenen Rollen (7) inkrementell umgeformt. Nachfolgend wird das Bauteil mit der hierfür entwickelten Zerspanungseinheit (3) vom Rest der Welle getrennt und über die Entladevorrichtung, mittels Rundmaterialgreifer (Kran) aus der Maschine transportiert. Die Sprühkühlung (9) hat die Aufgabe, sowohl die Drückrollen als auch den Stempel zu kühlen. Die dabei entstehenden Dämpfe und Gase werden durch die Aerosolabscheider (11) aus der Luft gefiltert. Der automatische Ablauf wird mittels CNC-Steuerung (12) ausgeführt und überwacht.

### 3.2 ENGINEERING

Grundlage für die Auslegung der Gesamtanlage und deren Einzelbaugruppen waren die am IWU bei Skalierungsversuchen ermittelten Kräfte und Momente. Hieraus leiteten sich die Dimensionen der Hauptbaugruppen des Walz- und Stempelsupports, sowie des Spannsystems ab.

#### Abschätzung Kraft- und Drehmomentbedarf

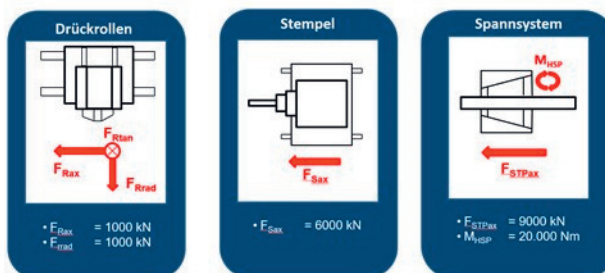


Abb. 9: Kraft- und Drehmomentbedarf

Das mit einem Außendurchmesser von  $\varnothing 1.090$  mm große und 4,1 t schwere Spanfutter (Abb. 10) erzeugt eine Spannkraft von über 5000 kN und wurde, wie auch der Walz- und Stempelsupport sowohl analytisch als auch mittels FEM berechnet und dimensioniert. Das Funktionsprinzip ist ein Keilschieberspannsystem für Werkstücke mit einem Durchmesser von 200–460 mm mit integriertem Hydraulikzugzylinder.

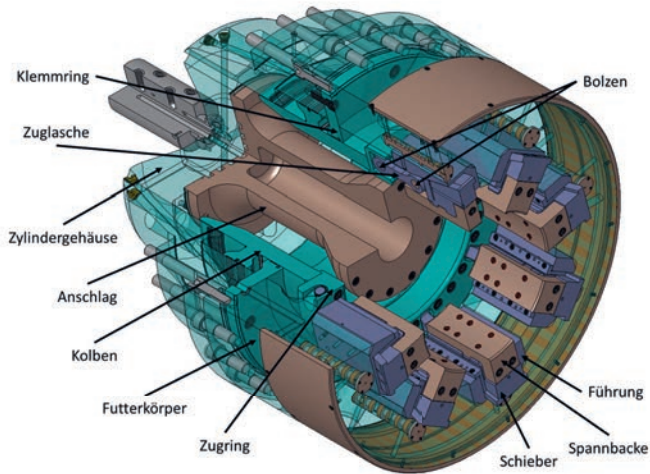


Abb. 10: CAD-Modell Keilschieberspannfutter

Der Walzsupport (Abb. 11), ist mit einem Gesamtgewicht von 39 t das Kernstück der BDA. Die drei, um  $120^\circ$  versetzt gelagerten Walzrollen erzeugen radiale Kräfte von jeweils 1000 kN und werden mit neuartigen vollgekapselten Elektro-Hydraulikeinheiten mit 4-Quadrantentechnologie der Firma Voith-Turbo betrieben. Die durch Hydromotoren einzeln angetriebenen Walzrollen leiten während des Umformprozesses 1880 Nm zusätzlich zur Hauptspindel in das Werkstück ein.

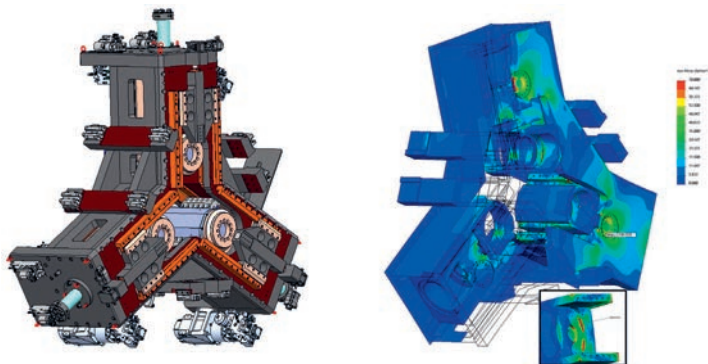


Abb. 11: CAD-Modell Walzrollensupport links; FEM-Analyse Walzsupport rechts

3000kN Vorschubkraft für den Walz- und 6000kN für den Stempelsupport, leiten insgesamt 9000kN (900t) über das Spannsystem in das Maschinenbett der Anlage. Das aus fünf geschweißten Trägern mittels Stehbolzen verbundene Grundgestell ist ein in sich geschlossenes System, welches die Reaktionskräfte der Hydraulikzylinder aufnimmt. Der auftretenden Längsdehnung der Gesamtanlage wurde entgegengewirkt, indem einzig der Hauptspindelkasten fest mit dem Boden verschraubt wurde. Die übrigen Maschinenfüße dienen als Gleitlager und können sich auf dem eigens hierfür im Boden eingelassen Stahlrahmen verschieben.

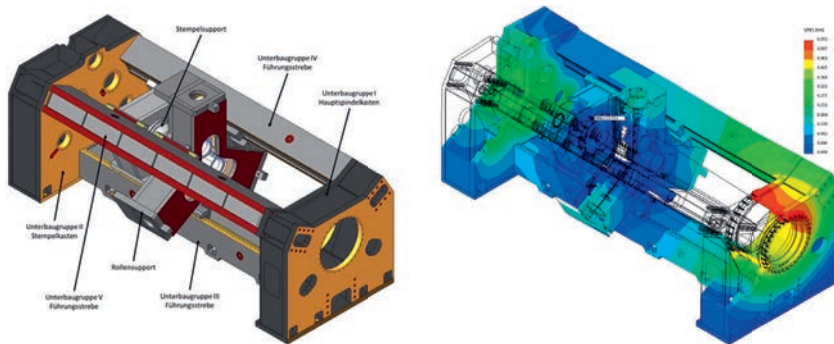


Abb. 12: Maschinenbett links, FEM-Analyse rechts

Die Hauptspindellagerung hat bei den Außenabmessungen von  $\varnothing 1600 \times 2000$ mm ein Gesamtgewicht von ca. 17t und ermöglicht der Hauptspindel ein Drehmoment von 20kNm bei max. 170U/min zu übertragen. Diese wird durch vier wassergekühlte 72kW Asynchronmotoren über eine 4:1 Stirnradstufe angetrieben. Die Abb. 13 zeigt die Gesamtheit der in der Maschine befindlichen Achsen.

Um die Erkenntnisse der Westsächsische Hochschule Zwickau praktisch umzusetzen, wurde für die BDA eine Zerspeneinheit konstruiert und gebaut. Hierbei handelt es sich um einen Sonderfräskopf mit einer HSK 100 Werkzeugschnittstelle, bei dem 1200Nm bei maximal 2000U/min zu realisieren waren. Für die notwendigen Bearbeitungsoperationen wurde der in 2 Achsen verfahrbare Support horizontal ausgerichtet.



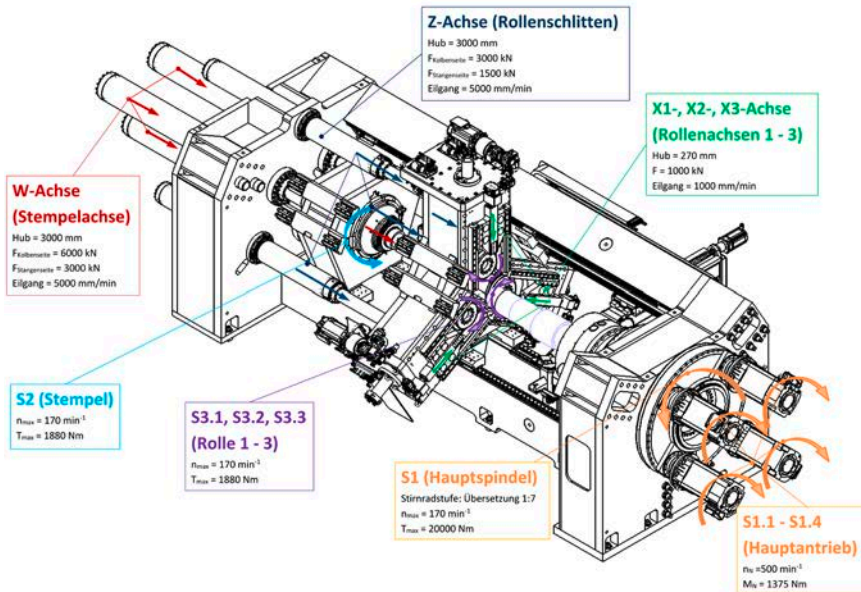


Abb. 13 Achsübersicht Bohrungsdrückanlage

Neben den Maschinenkomponenten waren weitere periphere Baugruppen wie Maschinenverkleidung, Brandlöschanlage und Aerosolabscheidung, sowie die Nebenaggregate zur Schmierung und Kühlung auszulegen und zu fertigen.

Alternativ zur klassischen Hydraulik wurden für die Rollenantriebe und deren radiale Zustellung neuartige von Voith Turbo entwickelte elektrohydraulische Antriebe verwendet. Die Vorteile sind die kompakte Bauweise, die geringe Geräuschemission, der Wegfall von Hydraulikaggregat und dessen Verrohrung sowie ein leakagefreier Betrieb bei geringerer Wärmeentwicklung. Diese kompakten Antriebs-Aktor-Einheiten ermöglichen wesentlich dynamischere Bewegungen und lassen sich hochgenau positionieren.

### 3.3 FERTIGUNG

Eine Herausforderung stellten die großen Schweißkomponenten des Maschinenbetts und der Supporte mit einem Gesamtgewicht von über 85t da. Die Schweißarbeiten führte eine externe Fachfirma aus. Die Bauteile und -gruppen wurden bei der Dreiling Maschinenbau GmbH spanend fertig bearbeitet und am Aufstellungsort in Chemnitz mit allen weiteren Komponenten montiert. (Abb. 14).



Abb. 14: Einpassen der Gleitleisten am Walzsupport bei Dreiling Maschinenbau GmbH

### 3.4 MONTAGE/TRANSPORT

Die Hauptbaugruppen der Bohrungsdrückanlage wurden im Werk in Geisleden bei EDM vormontiert und zusammen mit den Einzelteilen des Maschinenbetts in die Versuchshalle des Fraunhofer IWU Chemnitz transportiert. Mit der Unterstützung der Firma Scholpp und deren Spezialausrüstung, einem mobilen Hubgerüst und 160t-Kran konnte die Kernmaschine aufgebaut werden (Abb. 15).

Anschließend wurden Hydraulikaggregate, Schaltschränke, Kühlsystem und Pneumatik installiert und nach Fertigstellung der Maschinenverkleidung verrohrt und verkabelt. Abschließend wurden die Feuerlöschanlage und das Lüftungssystem montiert.

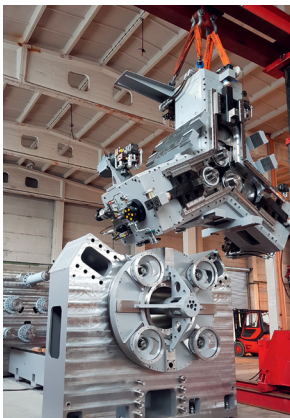


Abb. 15: Maschinenmontage am IWU in Chemnitz

### 3.5 INBETRIEBNAHME

Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWU, wobei Dreiling Maschinenbau hier hauptsächlich hardwareseitige Unterstützung leistete.

Es galt zwölf translatorische und sechs rotatorische Achsen, sowie alle Nebenaggregate in Betrieb zu nehmen, mit dem Ergebnis, dass nach ersten Drückversuchen mit kaltem Aluminium, die inkrementelle Umformung von heißen Bauteilen aus Vergütungs- und Einsatzstahl Abb. 16 durchgeführt werden konnten.

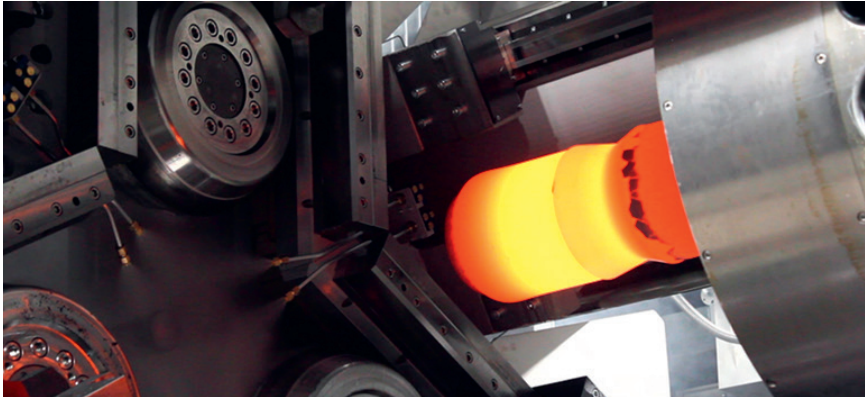
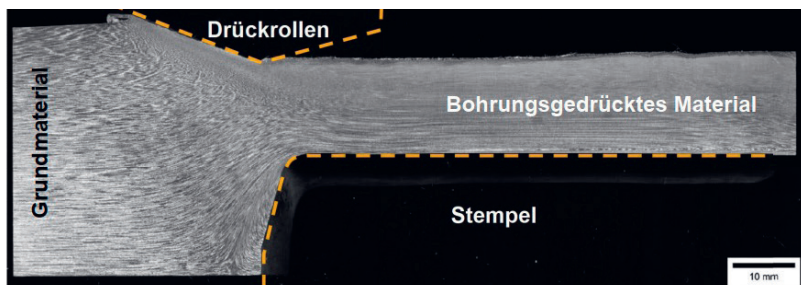


Abb. 16: Drückversuch mit Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 1.6587 ( $\varnothing 240$ ) bei 1100°C

#### 4. BEARBEITUNGSERGEBNISSE

Zur Verifizierung des Verfahrens Bohrungsdrücken und als Entscheidungsgrundlage für dessen industrielle Nutzung wurden am IWU Technologieversuche an kleinen Bauteilen durchgeführt. Zur Beurteilung der Versuchsergebnisse spielen Materialkennwerte eine wesentliche Rolle. Dazu gehören neben der Härtemessung und Gefügeuntersuchung auch Zug- und Kerbschlagbiegeversuche. Daraus wurde von der Flender GmbH ein Prüfplan spezifiziert, der durch das Prüflabor des DNV GL in Mühlheim abgearbeitet wurde. Aus den Versuchsproben wurden eigens für diese Untersuchung speziell standardisierte Prüfzahnäder herausgearbeitet, die an der FZG in München auf Zahnfußfestigkeit untersucht wurden.

Die beim Bohrungsdrücken durch den Umform- bzw. Fließvorgang erzeugten Strukturen werden nach einer Anätzung deutlich, wie in der Abb. 17 zu sehen.



Ätzung nach Wazau

Abb. 17: Durch Ätzung hervorgehobene Faserverläufe mit erkennbarer Fließrichtung (aus Bericht Prüflabor DNV GL Mühlheim)

Die momentane Position der Drückrollen und die Lage des Stempels sind hier angedeutet. Bei gleichzeitiger Bewegung von Rollen und Stempel nach links ist das Fließen des Materials entlang der Stempelwand nach rechts gut vorstellbar. Es ist anzumerken, dass bei diesen Proben auch das rückwärts gerichtete Abstreckwalzen stattfand (Rolle verfährt nach rechts), was eine Verjüngung des Außendurchmessers bei gleichzeitiger Längung des rohrförmigen Abschnittes bewirkt.

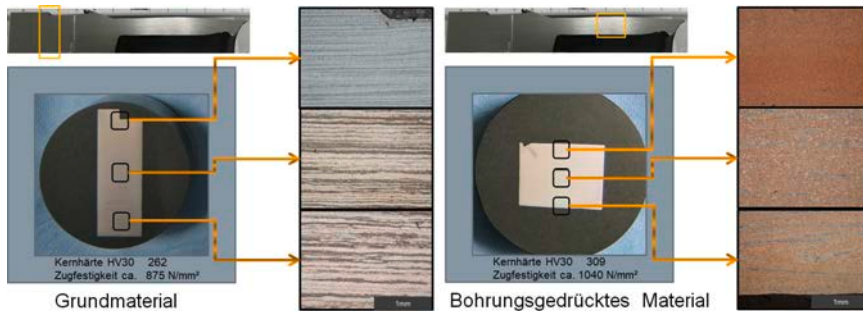


Abb. 18: Schliffbildvergleich von Grundmaterial links und bohrungsgedrücktem Material rechts

Die Abb. 18 zeigt Schliffbilder von Grundmaterial und bohrungsgedrücktem Material. Das Gefüge der durch die Rollen beeinflussten Außenzone zeigt sich beim bohrungsgedrückten Material oben rechts strukturell deutlich feiner als bei der Außenzone des Grundmaterials. Das bohrungsgedrückte Material zeigt im Längsschliffbild eine sehr feine bis feinstreifige Zeilenstruktur. Dies lässt auf eine komplexe Umformung dieser Zone mit hohen partiellen Umformgraden schließen.

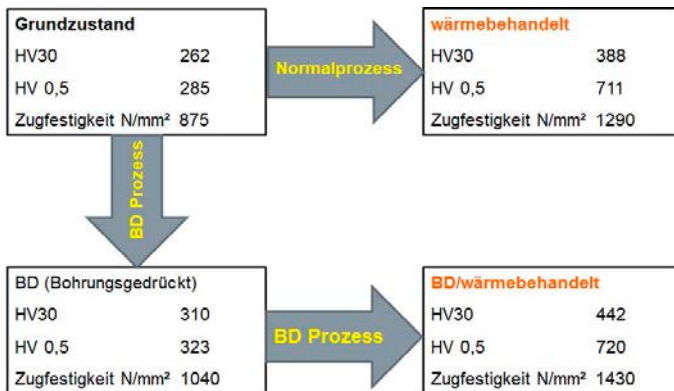


Abb. 19: Ergebnisse der Härtemessungen an 4 Materialzuständen einer Probe

Die Resultate der Härtemessungen (HV 30) an 4 Werkstoffzuständen und den daraus abgeleiteten Zugfestigkeiten, die durch das Bohrungsdrücken nach der Wärmebehandlung um 140N/mm² erhöht waren, zeigt Abb. 19. Die Ergebnisse decken sich mit Zugversuchsergebnissen des Prüflabors vom DNV GL (Mühlheim).

Wie bereits eingangs erwähnt, stellt die Zahnfußfestigkeit für den Getriebehersteller eine wichtige Kenngröße dar. Zu dessen Bestimmung wurden standardisierte Prüfzahnäder mit Modul 4,5 und Zähnezahl 16 bei der Flender GmbH gefertigt. Die aus den Versuchsergebnissen abgeleitete Wöhlerlinie zeigt Abb. 20. Hieraus wurde beim bohrungs-gedrückten Material eine Zahnfußdauerfestigkeit von 552 N/mm<sup>2</sup> berechnet, die über dem Niveau der Qualitätsstufe ME liegt. Dieses positive Ergebnis sehen wir in der hohen partiellen Umformung beim Bohrungsdrücken begründet. Die Gefügeuntersuchungen zeigten auch, dass sich eine durch die lange Wärmeeinwirkung befürchtete Grobkornbildung nicht bestätigte.

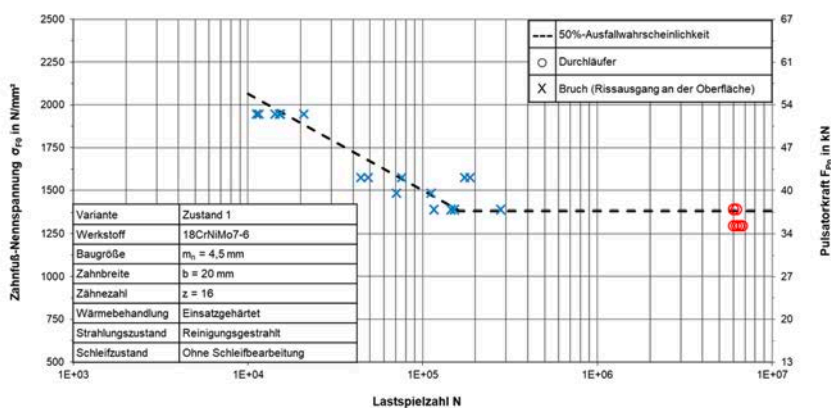


Abb. 20: Wöhlerlinie Zahnfußfestigkeit 18CrNiMo 7-6 Prüfzahnrad Modul 4,5 Zähnezahl 16 (aus Bericht FZG München)

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Ergebnis einer fachübergreifenden Zusammenarbeit der Industrieunternehmen Dreiling Maschinenbau GmbH (EDM) und Flender GmbH sowie den Forschungseinrichtungen Fraunhofer IWU und FH Zwickau entstand die technologische Basis zur Anwendung des Bohrungsdrückens als flexible Produktionstechnik zur energie- und materialeffizienten Fertigung von Schiffsgtriebewellen. Ausgehend von den Verfahrensgrundlagen wurde die Überleitung in die industrielle Anwendung vorbereitet. Dabei bestand die Herausforderung in einer grundsätzlich neuen und ganzheitlichen Betrachtung des Verfahrens als integraler Bestandteil bestehender Prozesse, unter Beachtung bauteilspezifischer Anforderungen und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen. Daraus resultierte ein dreistufiger Entwicklungsprozess, mit den Schwerpunkten Methodenplanung und Technologieverifizierung, der im Ergebnis einen exemplarischen Lösungsansatz für zwei maritime Anwendungen aufgezeigt, der die Grundlage für die Dimensionierung der Anlage war.

Diese Bohrungsdrückanlage wurde im Herstellerwerk EDM Geisleden konstruiert, gefertigt und im 250km entfernten Chemnitz aufgebaut und in Betrieb genommen. Sie ist 200 t schwer, hat einen Anschlusswert von 830 kVA, besitzt 18 gesteuerte NC-Achsen

und erzeugt hydraulisch eine Gesamtdrückkraft von 900 t sowie elektrisch ein Drehmoment von 20 kNm. Sie ist geeignet, auf 1000 °C erwärmte Bauteile in den Abmessungen von 200–460 mm Durchmesser (600 mm) und einer Länge von bis zu 2000 mm zu bearbeiten. Die dabei auftretenden Bauteilgewichte können bis zu 3 t betragen. Zum Projektende konnte das Bohrungsdrücken an 1000 °C heißem 250 mm Rundstahl demonstriert werden. Hierbei wurden Bohrungen mit 90 mm und einer Tiefe von 300 mm eingebracht.

Diese Demonstrationsanlage bildet die Grundlage für die systematische technologische Durchdringung des Bohrungsdrückprozesses. Zu den Fragestellungen gehören die erzielbaren Grenzen wie maximal erzeugbare Bohrungsdurchmesser und -tiefen, die dabei erzeugten lokalen Umformgrade und deren Wirkungen auf Bauteileigenschaften sowie deren simulative Vorhersage. Zudem ist die Anwendbarkeit des Verfahrens auf weitere umformbare Werkstoffe zu untersuchen.

## **DANKSAGUNG**

Das gesamte Projektkonsortium, bestehend aus der Flender GmbH Bocholt, der Dreiling Maschinenbau GmbH Geisleden, dem Fraunhofer IWU Chemnitz und dem IfP der Westsächsischen Hochschule Zwickau, bedankt sich sehr für die vom PtJ erhaltene Unterstützung bei der Projektbearbeitung und -koordinierung sowie für die vom BMWi gewährte wohlwollende finanzielle Unterstützung dieses Großprojektes. Unseren besonderen Dank möchten wir Frau Bude und Herrn Testa vom PtJ sowie Herrn Dr. Rüggeberg vom BMWi aussprechen.

## LITERATUR

- [1] H. Dube, M. Klotz und R. Glaß, „Exellente Grundlagenforschung und Wissenstransfer in die Wirtschaft - DFG Sonderforschungsbereich 283 und Transferbereich 50,“ in Chemnitzer Tradition und Perspektiven, Chemnitz, 2006.
- [2] R. Glaß und M. Popp, „Inkrementelles Hohlformen von Bauteilen des Antriebsstranges; Bohrungsdrücken - von der theoretischen Verfahrensentwicklung zur praktischen Anwendung,“ in 22. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, Düsseldorf, 2007.
- [3] U. Weißbach, Metalldrücken aus massiven Halbzeugen, Karl-Marx-Stadt: Dissertation TU Karl-Marx-Stadt, 1988.
- [4] U. Weißbach und G. Herold, „Bohrungsdrücken - vom Stangenmaterial zum Präzisionshohlteil,“ in Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz, 1994.
- [5] M. Behrens, Ermittlung des zu erwartenden Kraftbedarfes beim Bohrungsdrücken durch geometrisch skalierte Umformversuche, Dresden: Diplomarbeit TU Dresden, 2017.
- [6] M. Schneeweiß, J. Glühmann, M. Popp, R. Schuster und P. Häßlich, „Neue Umformstrategien für Getriebewellen und resultierende Herausforderungen bei der spanenden Weiterbearbeitung,“ Whitepaper umformtechnik.net, Verlag Meisenbach GmbH, pp. 1-11, 2017.





# ETA UP–

STEIGERUNG DES GESAMTNUTZUNGSGRADS UND REDUZIERUNG DER REIBVERLUSTE AM MITTELSCHNELLLAUFENDEN SCHIFFSMOTOR

## AUTOREN

DIPL.-ING. MARKO PÜSCHEL	FVTR GMBH, ROSTOCK
DIPL.-ING. THOMAS SADLOWSKI	FVTR GMBH, ROSTOCK
DR.-ING. MARTIN REISSIG	FVTR GMBH, ROSTOCK
M. SC. ALEXANDER DOTTEI	UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK

## EINLEITUNG

Der maritime Gütertransport wird heutzutage immer noch von effizienten Zwei- und Viertakt-Großdieselmotoren dominiert, die von den Schiffsmotorenherstellern im Hinblick auf niedrigen Kraftstoffverbrauch, hohe Lebensdauer und geringen Wartungsbedarf optimiert wurden. Die aktuellen Emissionsvorschriften sowie die zunehmende öffentliche Wahrnehmung der von Schiffen ausgehenden Emissionen führen zu einer verstärkten Erforschung alternativer Antriebssysteme und Kraftstoffe, aber bisher gibt es kein Szenario, in dem der klassische Dieselmotor in absehbarer Zeit in großen Stückzahlen ersetzt wird. Daher besteht nach wie vor Optimierungsbedarf für den klassischen Diesel-Verbrennungsmotor.

Es wurde festgestellt, dass Schiffsmotoren im Vergleich zu schnelllaufenden Leicht- und Schwerlastmotoren ein Potenzial zur Verbesserung ihres mechanischen Wirkungsgrades haben. Der Vergleich verschiedener Motorengrößen zeigt, dass kleinere Motoren Vorteile beim mechanischen und Großmotoren beim indizierten Wirkungsgrad haben [1], wie Abb. 1 zeigt. Basierend auf dieser Tatsache wurde das Projekt eta-up initiiert, um das Potenzial der Reibungsreduzierung zu untersuchen und den Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen.

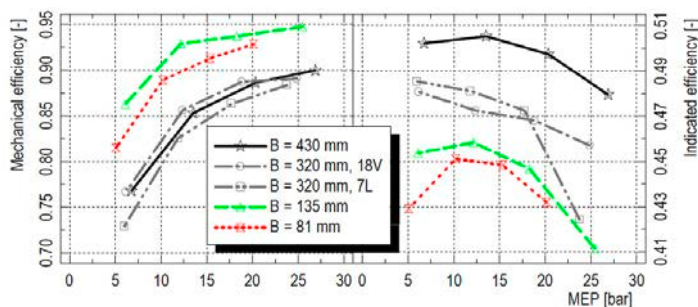


Abb. 1: Vergleich von mechanischen und indizierten Wirkungsgraden verschiedener Motorengrößen [2]

Dazu wurde ein bestehender Prüfstand mit einem Caterpillar MaK 6M20 aufgerüstet, um eine Vielzahl von reibungsbeeinflussenden Parametern wie z. B. die verbauten Lager, den Schmierölmassenstrom oder die Wechselwirkung zwischen Kolben und Lauffbuchse zu analysieren. Ziel dieser Untersuchungen war die Reduzierung der Reibungsverluste und damit eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs, wodurch die typischen Abgasemissionen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , PM,  $\text{SO}_x$ ) ebenfalls reduziert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Untersuchung war die Erfassung des räumlich aufgelösten Kolbentemperaturfeldes und der übertragenen Wärmeströme an Kolbenboden und Kolbenkühlraum. Diese Informationen werden benötigt, um die thermische Belastung des Kolbens besser zu verstehen, damit ein kritischer Betriebspunkt mit hoher thermischer Belastung frühzeitig erkannt und vermieden werden kann. Zu diesem Zweck wurden CFD-CHT-Simulationen durchgeführt, um die Wechselwirkung zwischen dem Gasaustausch und dem Verbrennungsprozess im Brennraum und der Wärmeleitung im Kolbenmaterial zu reproduzieren. Dieser Ansatz wurde wiederum genutzt, um das Temperaturfeld des Kolbens zu simulieren. Diese Simulationen beinhalten auch einen Vergleich zwischen zwei Kolbengeometrien und berücksichtigen verschiedene Motorlasten und Geschwindigkeiten. Um eine ausreichende Validierung dieser simulierten Ergebnisse zu gewährleisten, wurde eine drahtlose Datentelemetrie an einem speziell bearbeiteten Kolben implementiert, die in der Lage ist, zeitaufgelöste Daten von bis zu 16 Thermoelementen gleichzeitig aus dem Kurbelwellengehäuse zu übertragen. Es wurden sowohl schnell auflösende Oberflächenthermoelemente zur Erfassung der transienten Temperaturgradienten am Kolbenboden als auch Mantelthermoelemente zur Erfassung der Kolbenkerntemperatur verwendet. Die Standorte der Thermoelemente wurden so gewählt, dass der Wärmeübergang von der Kolbenkrone und dem Kolbenboden zum Kühlkanal quantifiziert werden kann. In diesem Beitrag werden die angewandten Simulations- und Temperaturmessmethoden sowie die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

## 2 EXPERIMENTELLER AUFBAU

### 2.1. FORSCHUNGSMOTOR UND PRÜFSTAND

Die Basis des Prüfstands bildet ein mittelschnelllaufender Forschungsmotor, der auf einem Caterpillar MaK 6M20 Kurbelgehäuse und Triebwerk basiert. Dieser ist mit einer elektrischen Belastungseinheit verbunden, welche den Motorbetrieb sowohl im Propeller- als auch im Generatormodus ermöglicht. Mit Ausnahme des Einspritzsystems sind alle anderen Komponenten, wie beispielsweise die Steuerzeiten und der Abgasturbolader identisch zum Serienmotor. Tab. 1 zeigt die technischen Daten des Forschungsmotors.

Tab. 1 : Technische Daten des Versuchsmotors

Caterpillar MaK 6M20 CR	-	Reihensechszylinder-Motor
Bohrung	mm	200
Hub	mm	300
Hubvolumen	l	56,4
Verdichtung	-	14,8
Nennleistung	kW	1020
Nenn Drehzahl	min-1	1000
Einspritzsystem	-	Common-Rail

Für die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen wurden die Medienkreisläufe des Versuchsmotors getrennt, um unabhängige sowie individuell einstellbare Medientemperaturen und -durchsätze zu realisieren. Dies ermöglicht zudem eine Energiebilanzierung der einzelnen Medienkreisläufe. Der schematische Aufbau des Prüfstands und seiner Komponenten ist in Abb. 2 dargestellt.

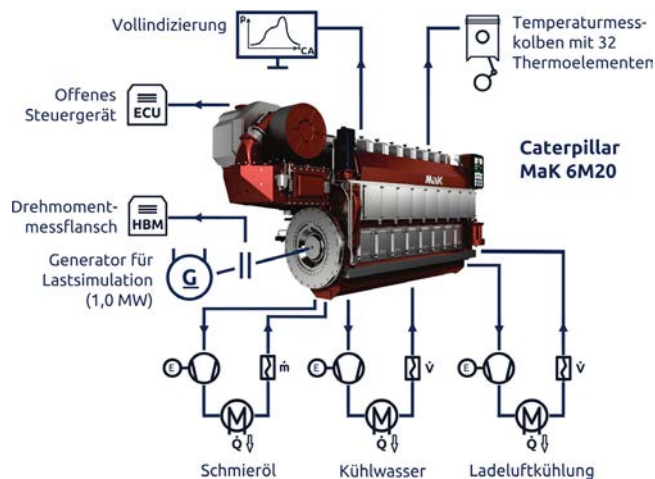


Abb. 2 : Schematischer Aufbau des Prüfstandes und technische Ausstattung

Zur weiteren Entkopplung der Medienkreisläufe wurden die angehängten Pumpen (Schmieröl, Kühlwasser) durch elektrisch angetriebene Exemplare ersetzt. Dies eliminiert den Einfluss der Motordrehzahl und gestattet eine Aufteilung der Reibungsverluste auf die einzelnen Motorkomponenten.

Um Informationen über die Reibverluste zu erhalten, ist der Versuchsmotor vollständig indiziert und mit einem hochpräzisen Drehmomentmessflansch ausgestattet. Zusätzlich sind an einer der sechs Zylinderstationen Zylinderkopf und Laufbuchse mit Thermoelementen bestückt, um Informationen über Reibverluste speziell in der Pleuellagerung zu sammeln.

## 2.2. AUFBAU DES TEMPERATURMESSKOLBENS

Der experimentelle Ansatz wird durch den Einsatz von Oberflächenthermoelementen (OTE) auf der Kolbenkrone und Mantelthermoelementen (MTE) in einem der Kolben ergänzt. Die Messdaten dienen der Validierung der Simulationsergebnisse wie z. B. der lokalen Kolbentemperaturen. Die Thermoelemente auf der Kolbenkrone sind im Wesentlichen entlang eines Spraykegels angebracht (Abb. 3, links oben). Wobei die Thermoelemente innerhalb der Kolbenkrone gleichmäßig in den durch das Motoröl gekühlten Bereichen verteilt sind (Kühlkanal, innerer Bereich des Kolbenhemdes).



Abb. 3: Sukzessive Bestückung eines Messkolbens zusammen mit der Fertigung des dazu angepassten Schwingensystems. Oben links ist die bedampfte Goldschicht dargestellt, wobei die nicht mehr sichtbaren Messstellen der Oberflächenthermoelemente als rote Punkte visualisiert werden. Oben rechts ist die Unterseite der Kolbenoberteils und unten links die Unterseite des Kolbenunterteils dargestellt, jeweils mit den ersten Thermoelementen und deren Verlegung im Material. Unten rechts sind die gefertigten und zusammengesetzten Schwingenelemente als Führung von Kolben zum Pleuel dargestellt.

Um eine hohe Haltbarkeit bei gleichzeitiger schneller Reaktionszeit zu gewährleisten, werden die Thermoelemente auf der Kolbenkrone unter Vakuum mit dünnen Chrom- und Goldschichten bedampft. Das primäre Ziel dieses Aufbaus ist die Generierung räumlich und zeitlich detailliert aufgelöster Daten des Temperaturfeldes und der Wärmeströme durch das Material. Die Signalübertragung wird über die Kombination aus einer Schwinde (Abb. 3, rechts unten) sowie einer Drahtlostelemetrie (Abb. 4), die am großen Pleuelauge befestigt wird, realisiert. Dieser Aufbau ermöglicht es, sowohl die langsamen Temperaturveränderungen innerhalb des Kolbenmaterials als auch die hochgradig transienten Oberflächentemperaturen während der Verbrennung zu überwachen.

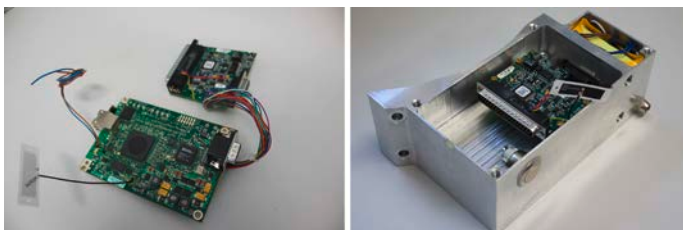


Abb. 4: Darstellung der Elektronik zur Signalübertragung (links) sowie des gefertigten Aluminiumgehäuses (rechts). Zu erkennen sind die verbauten Platinen, die Akkuzellen, der An/Aus-Schalter sowie der externe Ladeanschluss an der Außenseite des Gehäuses.

### 3. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

#### 3.1. REFERENZMESSUNG

Ein primäres Ziel des Projekts war die Identifizierung von Parametern, welche die Reibungsverluste positiv oder negativ beeinflussen. Um Ausgangswerte zu definieren, wurden Referenzmessungen am Motor durchgeführt.

Auf den ersten Blick entsprechen die Ergebnisse der Referenzmessungen den Erwartungen. Wie in Abb. 5 dargestellt, führt eine Steigerung der Motorlast zu einer Erhöhung des Reibmitteldrucks. Außerdem ist die Reibung stark von der Motordrehzahl abhängig (vgl. Propellerbetrieb).

Ein weiteres wichtiges Projektziel war die Aufteilung der Motorgesamtreibung auf die verschiedenen Motorkomponenten und die Identifizierung ihrer Einflussfaktoren und -parameter auf die Reibung. Abb. 5 zeigt deutlich, dass die angehängten Pumpen einen erheblichen Anteil der (berechneten) Reibungsverluste – bis zu 41 % – ausmachen und von der Motorlast abhängen (vgl. Reibungsverluste der HD-Kraftstoffpumpe). Bedingt durch die direkte Kopplung des Schmieröldrucks an die Motordrehzahl und die Laststeuerung ist die Schmierölpumpe der Hauptverbraucher der parasitären Leistung. Elektrisch angetriebene, drehzahlgesteuerte Pumpen sind ein Weg diesen Energieverbrauch zu senken.

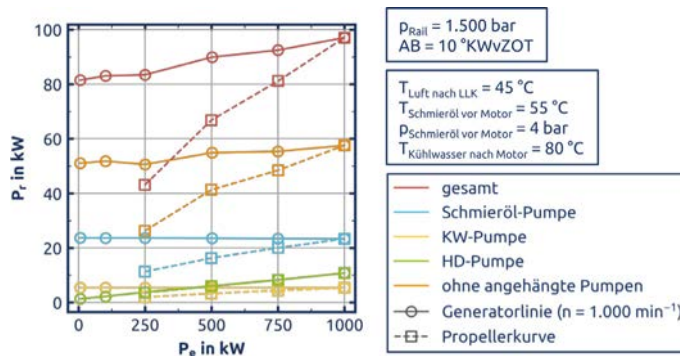


Abb. 5: Reibungsverteilung des Versuchsmotors im Generator- und Propellerbetrieb

#### 3.2. REIBUNGSBEEINFLUSSENDE PARAMETER

Zur systematischen Identifizierung und Quantifizierung der Parameter, die Einfluss auf die Reibung haben, wurden Versuche mit Variation der Ladeluft-, der Kühlwasser- und der Schmieröltemperatur sowie des Schmieröldrucks durchgeführt.

Die Variation der Ladelufttemperatur zeigt einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Reibung, was den Erwartungen entspricht. Bei Betrachtung der Energiebilanzen bzw. der Änderung der Wärmestromverteilung in Abb. 6 wird deutlich, dass die Anhebung der Ladelufttemperatur einen negativen Einfluss auf den effektiven Wirkungsgrad des Motors

hat – Absinken der Wellenleistung. Dennoch kann ein positiver Effekt auf den Gesamtnutzungsgrad erzielt werden, wenn die gesteigerten Abwärmen in Abgas, Schmieröl und Motorkühlwasser ausgenutzt werden.

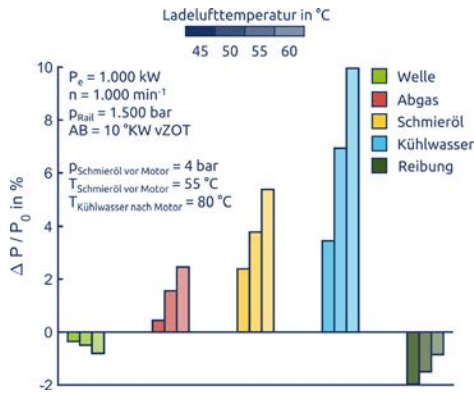


Abb. 6: Änderung der Wärmestromverteilung und Reibung des Versuchsmotors bei Variation der Ladelufttemperatur

Die Ergebnisse der Variation der Kühlwassertemperatur liefern ein ähnliches Bild. Abb. 7 zeigt die Variation der Kühlwassertemperatur in einem Temperaturbereich von 70 bis 95 °C bei einer Last von 750 kW und einer Drehzahl von 1.000 min<sup>-1</sup>.

Das Diagramm bildet die schrittweise relative Abweichung der Wellenleistung, des Abgas-, Schmieröl- und Kühlwasserwärmestroms sowie die Reibung vom Startbetriebspunkt ab.

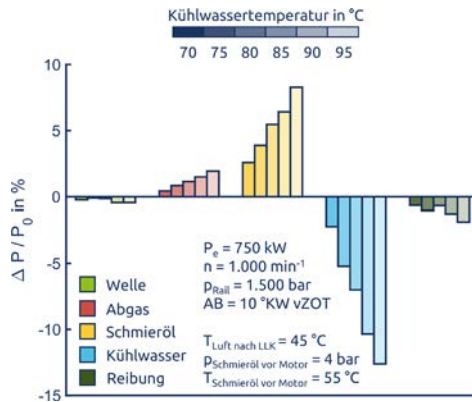


Abb. 7: Änderung der Wärmestromverteilung und Reibung des Versuchsmotors bei Variation der Kühlwassertemperatur (nach Motor)

Wie aus Abb. 7 ersichtlich, reduziert eine Erhöhung der Kühlwassertemperatur die Reibung nur geringfügig. Auffällig ist die Verschiebung des Wärmestroms in selben Umfang vom Kühlwasser zum Schmieröl bei unverändertem Gesamtwärmestrom des Motors.

Im Gegensatz dazu zeigt eine Variation der Schmieröltemperatur eine wesentlich höhere Abhängigkeit und ein erheblich höheres Potenzial zur Reduktion der Reibung. Die Schmierfilmbildung und der -abrieb limitieren den untersuchten Temperaturbereich auf 45 bis 70 °C. Abb. 8 zeigt die Ergebnisse der Schmieröltemperatur-Variation bei einer Last von 750 kW und einer Drehzahl von 1.000 min<sup>-1</sup>.

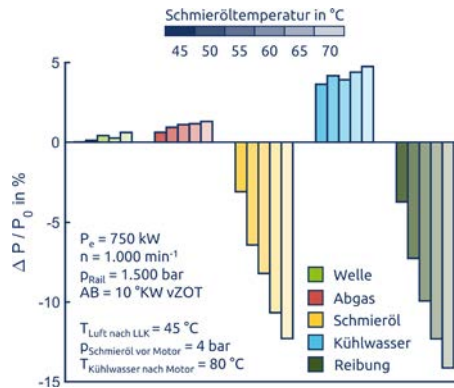


Abb. 8: Änderung der Wärmestromverteilung und Reibung des Versuchsmotors bei Variation der Schmieröltemperatur (vor Motor)

Die hohe Reibungsreduktion aufgrund der niedrigeren Viskosität ist deutlich erkennbar. Diese Reduktion führt direkt zu einer Verringerung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und einem Anstieg des Gesamtwirkungsgrades – erkennbar an der gestiegenen Wellenleistung.

Der vierte untersuchte reibungsbeeinflussende Parameter ist die Variation des Schmieröldrucks zwischen 3 und 5 bar(a) (Abb. 9). Der Variationsbereich ist durch die Gefahr von Lagerschäden, Kolbenfressern bzw. -klemmern und dem nötigen Schmieröldruck vor Abgasturbolader begrenzt.

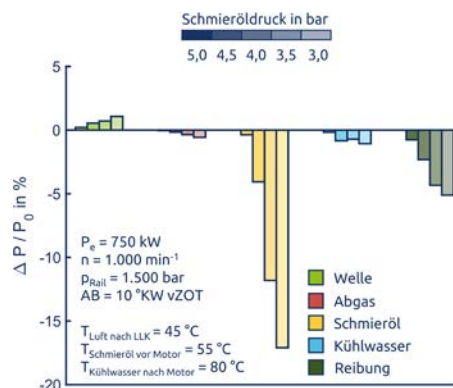


Abb. 9: Änderung der Wärmestromverteilung und Reibung des Versuchsmotors bei Variation des Schmieröldrucks (vor Motor)

Eine Absenkung des Schmieröldrucks hat einen positiven Effekt auf die Reibung. Im Vergleich zu einer Temperaturanhebung ist dieser Effekt allerdings nur ein Viertel so groß. Dieses Potenzial kann für eine auf den Motorbetriebspunkt angepasste Schmieröldruckregelung genutzt werden.

Die Reibungsreduktion mit sinkendem Schmieröldruck kann durch einen verringerten Schmierölmassenstrom und daraus resultierenden längeren Verweilzeiten des Schmieröls in den Lagern erklärt werden. Diese längere Verweilzeit führt zu höheren Schmieröltemperaturen und somit zu niedrigeren Schmierölviskositäten in den Lagern.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich sowohl eine Erhöhung der Schmieröltemperatur als auch eine Absenkung des Schmieröldrucks messbar positiv auf die Reibung und somit auch den Kraftstoffverbrauch sowie die Abgasemissionen auswirken. Zudem wandeln hohe Schmieröltemperaturen bisherige Verluste (Niedertemperatursystem (NT)) in nutzbare Energie (Hochtemperatursystem (HT)) um. Dadurch steigt die Qualität der Wärmeenergie und der Gesamtnutzungsgrad.

### 3.3. KOLBENTEMPATURMESSUNG

Wie in Abb. 10 zu sehen, kann das installierte System die transienten Temperaturänderungen im Kolben während der Verbrennung auch bei hohen Gradienten erfassen. Hochfrequente Schwingungen überlagern die Temperatursignale infolge elektromagnetischer Störungen in der Umgebung. Dennoch konnten Temperaturmessungen mit Hilfe von Bandfiltern problemlos und ohne Datenverlust analysiert werden. Spitzenwerte konnten so eindeutig definiert werden.

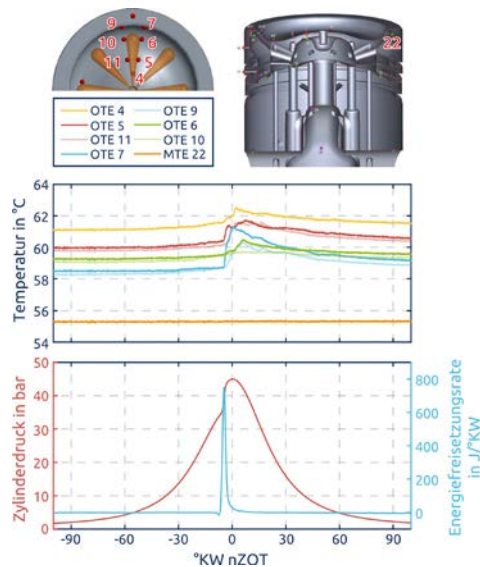


Abb. 10: Vergleich der transienten Temperatursignale an der Kolbenkrone, innerhalb des Kolbens und des experimentell ermittelten Zylinderdrucks sowie der Energiefreisetzungsrates im Leerlauf bei 400<sup>min-1</sup>



Darüber hinaus sind die zeitaufgelösten Temperatursignale gut mit dem kurbelwinkel- aufgelösten Drucksignal synchronisiert. Der Temperaturgradient steigt erst langsam mit steigender Kompression und dann rapide, sobald die Verbrennung startet. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass der Temperaturanstieg gegenüber der Wärmefreisetzung immer einer kleinen Verzögerung unterliegt. Dies ist begründet in der kleinen thermischen Trägheit und in der benötigten Zeit, die die Flammenfront benötigt, um die Kolbenkronenoberfläche zu erreichen.

Weiterhin sind bei einigen Thermoelementen trotz symmetrischer Anordnung entlang eines Spraykegels leichte Unterschiede im Startzeitpunkt des Temperaturanstiegs und in den Maximaltemperaturen erkennbar. Diese Unterschiede können genutzt werden, um die simulierte Verbrennung hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Flammenfront zu überprüfen und so den Wärmeübergang in den Kolben zu korrigieren.

### 3.4. VALIDIERUNG DES VERBRENNUNGSMODELLS

Da die Durchführung von Prüfstandsversuchen für alle Lastpunkte sehr zeitaufwändig wäre, wird das Ziel verfolgt, die Referenzdaten zur Validierung des gekoppelten CFD-CHT Modells der Schnittstelle zwischen Brennraum und Kolben zu nutzen. In Folge können validierte Lastpunkte genutzt werden, um transiente Randbedingungen zur Berechnung des endgültigen Kolbentemperaturfelds bei stationären Motorzuständen zu definieren.

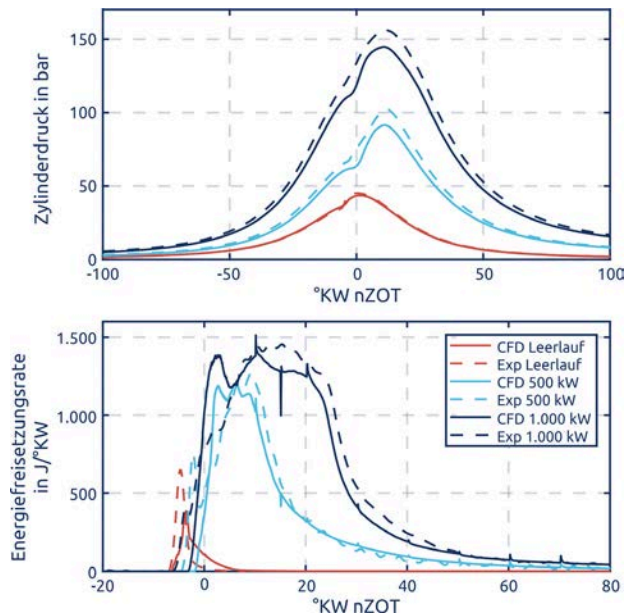


Abb.11: Vergleich des Zylinderdrucks und der Energiefreisetzungsrates zwischen der kombinierten Kolben-Brennraum-Simulation und experimentell ermittelten Versuchsdaten

Zur Simulation der drei in Abb. 11 dargestellten Betriebspunkte wurde das gleiche Modell mit ähnlichen Modellparametern (z. B. Verbrennungsmodell) verwendet. Allerdings sind noch kleine Abweichungen, z. B. beim maximalen Zylinderdruck oder im Zündverzug erkennbar. Trotzdem wird deutlich, dass diese Methode in der Lage ist, den globalen Verbrennungsprozess abzubilden. Die Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation ist ausreichend, um eine Extrapolation zusätzlicher Lastpunkte zu ermöglichen. Weiterhin kann angenommen werden, dass die simulierte lokale Temperaturverteilung präzise genug ist, um als Randbedingung für die anschließenden stationäre Berechnungen genutzt zu werden.

### 3.5. VERGLEICH DER KOLBENGEOMETRIE

Ein weiterer Bestandteil des Projektes war die Untersuchung einer Kolbenvariation. Für die Umsetzung der neuartigen Evo-Kolbenvariante wurde bereits in der Anfangsphase des Projekts eine separate Arbeitsgruppe – KoRiBu – gebildet. Die Gruppe bündelte nochmals die Expertise der Assoziativ- und Projektpartner auf dem Gebiet der Kolbenbauart – Kolben, Kolbenringe, Lauffbuchse, Kolbenbolzen.

Da der Evo-Kolben in Gänze 60 mm niedriger ist und auch die Kompressionshöhe reduziert, aber jedoch nicht das Kompressionsverhältnis des Motors verändert wurde, mussten verlängerte Pleuel und gekürzte Lauffbuchsen entwickelt und verbaut werden. Abb. 12 zeigt den Vergleich zwischen dem aktuellen Serien- und dem neuen Evo-Kolbendesign, das von modernen schnelllaufenden Dieselmotoren inspiriert wurde.

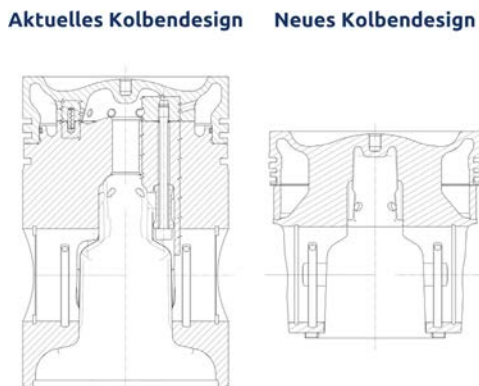


Abb. 12: Vergleich von aktuellem Serien- und neuartigem Evo-Kolbendesign

Aufgrund der Neuartigkeit des Kolbendesigns und des Prototypenstatus wurde in der Arbeitsgruppe einstimmig beschlossen, einen Dauerlauf von 50 Stunden bei Vollast durchzuführen. Anschließend erfolgte ein Endoskopieren aller Zylinderstationen mit Auswahl von drei Zylinderstationen für eine weitere Befundung. Es konnten keine gravierenden Mängel an den Prototypenbauteilen festgestellt werden. Somit wurde der Messbetrieb mit den Evo-Bauteilen freigegeben.

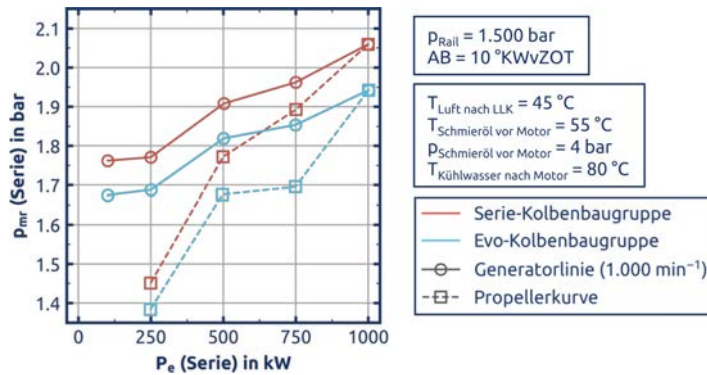


Abb. 13: Vergleich der Reibmitteldrücke zwischen der Serien- und Evo-Kolbenbaugruppe ermittelt über die Basismessungen

Bei den Untersuchungen wurden mit dem Evo-Kolbenbaugruppe Basismessungen durchgeführt. Abb. 13 zeigt den Vergleich der Reibmitteldrücke zwischen der Serien- und Evo-Kolbenbaugruppe auf der Generatorlinie und der Propellerkurve. Die deutliche Reibungsreduktion durch die Evo-Kolbenbaugruppe ist klar erkennbar. Dies schlägt sich ebenfalls deutlich in einer Verbrauchsreduktion nieder, wie Abb. 14 zeigt. Die höchsten Reduktionen bei Reibung und spezifischem Kraftstoffverbrauch werden bei der Nenndrehzahl des Motors von 1.000 min<sup>-1</sup> und Teillast erreicht.

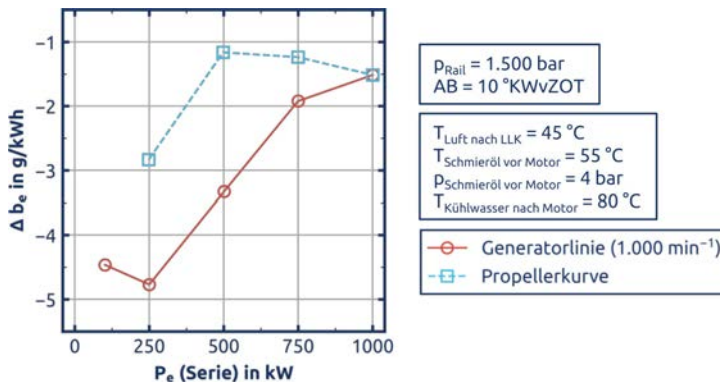


Abb. 14: Erzielte Verbrauchsreduktion durch die Evo-Kolbenbaugruppe im Generator- sowie Propellerbetrieb

Diese Ergebnisse werden ebenfalls von den Auslaufversuchen bestätigt. Die geringere Reibung der Evo-Kolbenbaugruppe verursacht eine längere Auslaufzeit des Motors. Ähnliches zeigt sich im Vergleich, wenn die Schmieröltemperatur vor Motor um 10 °C erhöht wird (Abb. 15).

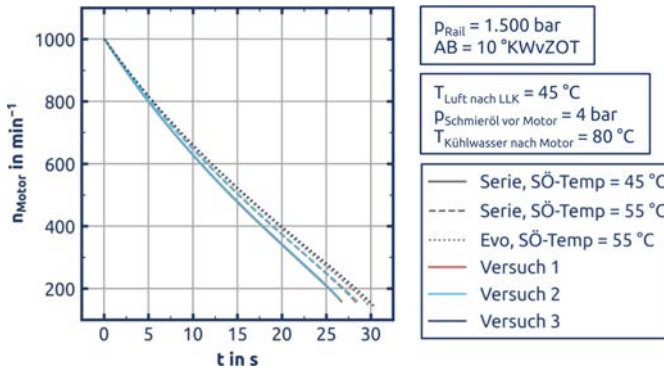


Abb. 15: Vergleich des Motorauslaufens zwischen der Serien- und Evo-Kolbenbaugruppe

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

In der Vergangenheit waren die Hauptverkaufsargumente von Großmotoren die Gesamtwirkungsgrade, die hauptsächlich auf ihre hohen indizierten Wirkungsgrade zurückzuführen sind. Gleichzeitig konnten kleinere Motoren durch erhebliche Fortschritte beim mechanischen Wirkungsgrad aufschließen. Um das Potenzial und die Expertise der Kleinmotoren auf den Großmotorenbereich zu übertragen, wurde das eta-up-Konsortium gegründet. Ziel war es, die reibungsbeeinflussenden Parameter zu identifizieren und zu systematisieren sowie ein Konzept zur Reibungsminimierung für mittelschnelllaufende Schiffsdieselmotoren zu entwickeln.

Als ein wichtiges Resultat dieses Projekts kann die Identifikation der Schmierölpumpe als wesentlicher parasitärer Verbraucher der Motorperipherie genannt werden. Sie weist durch ihre Drosselregelung ein hohes Reibungsreduktionspotenzial auf. Die Nutzung einer elektrisch angetriebenen Schmierölpumpe mit Drehzahlregelung erlaubt Reibungs- bzw. Antriebsenergieerduktionen von bis zu 50 %.

Weiterhin wurden die reibungsbeeinflussenden Motorparameter analysiert. Die Ladelufttemperatur hat keinen messbaren Einfluss auf die Reibungsverhalten. Ähnliches Verhalten zeigt die Variation der Kühlwassertemperatur. Gegenätzlich dazu verhalten sich Änderungen bei Schmieröldruck und -temperatur. Ein abgesenkter Schmieröldruck kann auf zwei Weisen die Reibung reduzieren. Zum einen ist dies durch eine erhöhte Verweilzeit des Schmieröls in den Lagern und der damit einhergehenden verringerten Viskosität begründet. Zum anderen ist die Applikation einer bedarfsgerechten Schmierölversorgung zu nennen. Eine Erhöhung der Schmieröltemperatur hat ein signifikantes Reibungsreduktionspotenzial und führt direkt zu erheblichen Senkungen des spezifischen Kraftstoffverbrauchs. Zusätzlich bieten hohe Schmieröltemperaturen gesteigertes Potenzial für Wärmerückgewinnungssysteme, um den Gesamtnutzungsgrad des Motors durch eine qualitative Erhöhung der Wärmeauskopplungsniveaus zu steigern. Im Weiteren wurde gezeigt, dass die Kolbengeometrie ebenfalls Einfluss auf die Reibung hat. So konnte in dem Projekt ein Evo-Kolben die den Reibmitteldruck signifikant mindern.

Abschließend soll eine Systematisierung der Einzelmaßnahmen das Gesamtpotenzial hinsichtlich der Reibungsreduktion und der Nutzungsgradsteigerung aufzeigen. Wie bereits beschrieben, sind die Haupteinflussgrößen der Reibung die Medienpumpen, die Schmieröltemperatur und der -druck sowie das Design der Kolbenbaugruppe.

Tab. 2: Reduktion der Reibung durch Einzelmaßnahmen und in Summe

Parameter	100 % Last	50 % Last (Generator)	50 % Last (Propeller)
Ladelufttemperatur	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Kühlwassertemperatur	0,8 %	0,8 %	2,8 %
Schmieröltemperatur	6,1 %	6,7 %	6,2 %
Schmieröldruck	4,4 %	5,1 %	2,8 %
Kühlwasserdurchsatz	-	0,0%	-
Design Kolbenbaugruppe	5,7 %	4,7 %	5,4 %
Schmieröl	-1,9 %	-1,7 %	-
Schmierölpumpe (drehzahleregelt)	16,0 %	17,6 %	12,0 %
KW-Pumpe (drehzahleregelt)	2,1 %	2,3 %	-0,1 %
<b>Summe</b>	<b>35,1 %</b>	<b>37,2 %</b>	<b>29,2 %</b>

Für einen reibungsoptimierten Betrieb, d. h. die Kombination aller effektiven Einzelmaßnahmen, sind der Einsatz der neuartigen Evo-Kolbenbaugruppe, hohe Schmieröltemperaturen bei reduzierten Schmieröldurchsätzen sowie drehzahleregelte Pumpen für Schmieröl und Kühlwasser (elektrischer Wirkungsgrad = 90 %) von Nöten, wie Tab. 2 zeigt. So ist eine Reibungsreduktion von über 37 % möglich.

Zu beachten ist, dass nur eine Schmieröldurchsatzreduktion durch eine angepasste Schmierölpumpe auch zu einem Absinken des Schmieröldrucks führt. Reduzierte Schmieröldrücke können Kavitation bedingen. Aus diesem Grund sollte eine Reduktion des Schmieröldrucks vermieden werden. Simulationsergebnisse der beiden Projektpartner Caterpillar und Kolbenschmidt bestätigen einen hohe Schmieröldurchsatz am Kurbeltrieb, der konstruktiv reduziert werden könnte.

Tab. 3 zeigt die einzelnen und das kumulierte Potenzial der Maßnahmen zur Nutzungsgradsteigerung. Es zeigt sich deutlich, dass eine gesteigerte Schmieröltemperatur und die Nutzung einer zweistufigen Ladeluftkühlung großes Potenzial zur Steigerung des Nutzungsgrads aufweisen. Geringe Vorteile ergeben sich durch die Steigerung der Ladelufttemperatur.

Tab. 3: Steigerung des Nutzungsgrads durch Einzelmaßnahmen und in Summe

Parameter	100 % Last	50 % Last (Generator)	50 % Last (Propeller)
Ladelufttemperatur	2,3 %	1,7 %	1,8 %
Kühlwassertemperatur	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Schmieröltemperatur	7,9 %	8,8 %	6,5 %
Schmieröldruck	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Kühlwasserdurchsatz	0,0 %	0,0 %	-
Zweistufiger Ladeluftkühler	13,3 %	3,0 %	1,2 %
<b>Summe</b>	<b>23,5 %</b>	<b>13,5%</b>	<b>9,5 %</b>

Ebenfalls deutlich zu erkennen ist, dass die größten Potenziale zur Steigerung des Nutzungsgrads im Volllastbetrieb liegen. Das lässt sich hauptsächlich auf die Kühlung der Ladeluft zurückführen. Im Volllastbetrieb erfährt diese nicht nur eine Drucksteigerung, sondern auch eine erhebliche Temperatursteigerung über den Verdichter. Durch die erforderliche Ladeluftkühlung mittels zweistufigem Ladeluftkühler wird ein signifikanter Anteil der Wärme nutzbar.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung und dem Projektträger Jülich für die Administration und Unterstützung des Projekts „eta-up - Steigerung des Gesamtnutzungsgrads und Reduzierung der Reibverluste am mittelschnelllaufenden Schiffsmotor“ (Projektnummer: 03SX419). Weiterhin gilt unser Dank der Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG, der IST mbH, der Technische Universität Braunschweig, der ADDINOL Lube Oil GmbH, der FEDERAL-MOGUL Burscheid GmbH, der M. JÜRGENSEN GmbH & Co KG, der KS Kolbenschmidt GmbH, der RICKMEIER GmbH und der ZOLLERN BHW Gleitlager GmbH & Co. KG für die Unterstützung dieses Projekts.

## LITERATUR

- [1] Wolf, R.; Eilts, P. Comparison of Fuel Consumption and Emissions of Automotive and Large-Bore Diesel Engines. In: SAE International Journal of Engines, Nr. 7 (2014), S. 221-233.
- [2] Wolf, R. Technologietransfer zur Übertragung von CO<sub>2</sub>- und Schadstoffemissionspotentialen zwischen verschiedenen Motorarten. FVV-Vorhaben Nr. 1019, Heft H988. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), 2013.





# LEDf2-KONZEPTE –

LOW EMISSION DUAL FUEL-KONZEPTE 2: ADAPTIVE BRENNVERFAHRENS-KONZEPTE FÜR EFFIZIENTE UND EMISSIONSARME SCHIFFSDIESELMOTOREN BEI EINSATZ STARK VARIIERENDER BRENNGASE

## AUTOREN

M. SC. SEBASTIAN CEPELAK	LKV, UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK
PROF. DR. BERT BUCHHOLZ	LKV, UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK
DR.-ING. SASCHA ANDREE	LTT, UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK
DIPL.-ING. KARSTEN SCHLEEF	LKV, UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK
M. SC. BJÖRN HENKE	LKV, UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK

## EINLEITUNG

Die zunehmende Reglementierung von maritimen Grenzwerten für Emissionsbildungen in der Schifffahrt hat einen intensiven Entwicklungsbedarf für schadstoffarme und effiziente Antriebe zur Folge. Darüber hinaus werden immer mehr Küstenbereiche zu Emission Control Areas (ECAs) benannt, in denen die Emissionsgrenzen nochmals verschärft werden. Neben den gesetzlich festgelegten Schadstoffgrenzen spielt die Minimierung von GHG-Emissionen ebenfalls eine entscheidende Rolle für die Umwelt.

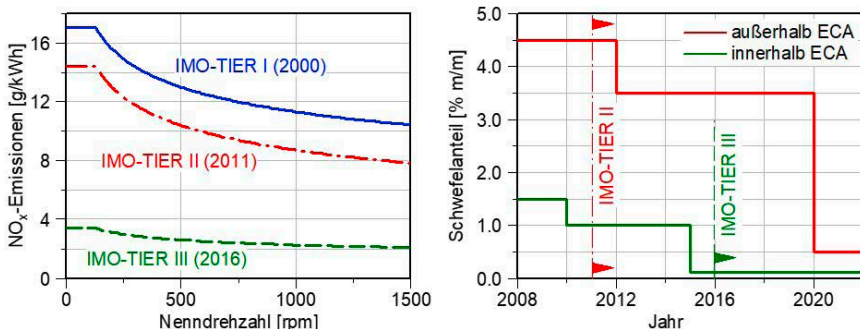


Abb. 1: NO<sub>x</sub>-Grenzwerte und zulässiger Kraftstoffschwefelanteil für Antriebsmaschinen seegehender Schiffe

Einen aussichtsreichen Ansatz zur innermotorischen Emissionsenkung bietet das Dual-Fuel-Brennverfahren. Hier wird eine deutliche Minimierung der Partikel-, Stick- und Schwefeloxidemissionen im Vergleich zum konventionellen dieselmotorischen Brennverfahren erreicht. Während Schwefeloxide (SO<sub>x</sub>) durch das quasi schwefelfreie Brenngas keine Rolle spielen, muss bei den Stickoxiden der klassische Trade-Off zu den Gesamtreibhausgasemissionen betrachtet werden. Üblicherweise können beide Emissionsarten nicht gleichzeitig optimal

seitens des Brennverfahrens eingestellt werden. Es obliegt daher dem Motorenhersteller bzw. dem Applikateur einen geeigneten Kompromiss zu finden und im Motorsteuergerät zu hinterlegen. Das Problem besteht hierbei in dem als Hauptenergieträger eingesetzten Methan, das bezogen auf einen Zeithorizont von 20 bzw. 100 Jahren ein Treibhausgaspotential von 84 bzw. 28 im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid aufweist. Das unverbrannte Methan, welches als sogenannter Methanschlupf bekannt ist, muss daher ebenfalls durch gezielte Maßnahmen vermieden werden.

Ziel des Projektes LEDF-Konzepte-2 ist die Untersuchung des Dual-Fuel-Brennverfahrens im Hinblick auf die Analyse, Beeinflussung und Kontrolle der ablaufenden Prozesse bei Zündung und Verbrennung. Dabei soll der Fokus auf die Senkung der entstehenden Schadstoffemissionen bei gleichzeitiger Steigerung von Wirkungsgrad und Leistungsdichte liegen. Grundlegende Themenschwerpunkte sind hierbei Untersuchungen zu Dieseleinspritzstrategien und variierender Gasqualitäten auf das Gesamtverhalten des Brennverfahrens.

Zu diesem Zweck bildete sich im Oktober 2016 das Projektkonsortium aus insgesamt sieben Partnern aus Forschung und Industrie, die das Vorhaben mit ihrer individuellen Expertise unterstützten und im Folgenden benannt werden:

- › Universität Rostock - Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (LKV)
- › Universität Rostock - Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT)
- › Forschungszentrum Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock GmbH (FVTR)
- › Caterpillar Motoren GmbH und Co. KG (assoziiert)
- › Kolbenschmidt Pierburg AG (assoziiert)
- › Kompressorenbau Bannewitz GmbH (assoziiert)
- › Schaller Automation - Industrielle Automationstechnik GmbH & Co. KG (assoziiert)

## 2. PRÜFSTAND

Im Rahmen der Verbundprojekte „LEDF-Konzepte-1 & 2“ wurde ein motorischer Versuchsträger geschaffen, der auf der Powerunit M34DF der Firma Caterpillar Motoren GmbH und Co. KG basiert. Dieser bietet die Möglichkeit das Brennverfahren von mittelschnelllaufenden Dual-Fuel-Motoren, wie bspw. in Fähren oder Kreuzfahrtschiffen angewendet, zu erforschen. 1-Zylinderaggregate sind dabei prädestiniert für die zeit- und kosteneffektive Umsetzung neuer Entwicklungs- und Optimierungsansätze von Brennverfahren.

Das Dual-Fuel-Prinzip basiert auf der Verbrennung eines Brenngas-Luft-Gemisches in Kombination mit einer für die Zündung zuständigen Diesel-Pilotmenge. Im Falle der äußeren Gemischbildung wird die Ansaugluft über ein vor dem Motor angebrachtes Ventil mit Gas

angereichert, was durch den 4-Takt-Prozess zu einer Homogenisierung des Gemisches im Brennraum führt. Während des Verdichtungsstaktes wird eine sogenannte Zündmenge in Form von Dieseldieselfkraftstoff direkt in den Brennraum eingespritzt, welche sich durch den Anstieg von Druck und Temperatur selbst entzündet. Hierdurch wird wiederum das umgebende Brenngas-Luft-Gemisch entzündet und verbrannt.

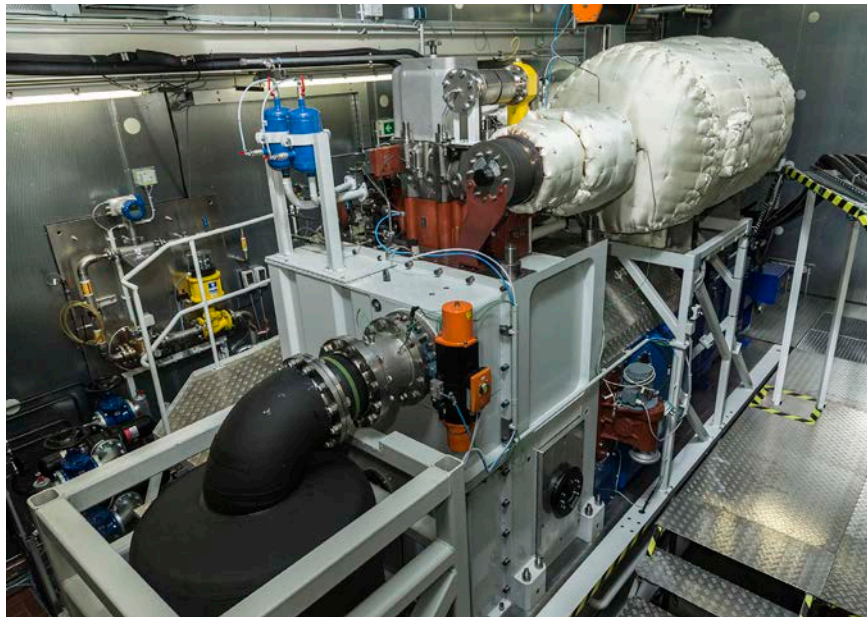


Abb. 2: Forschungsmotor 1M34DF der Universität Rostock

Der Prüfstand ist dank modernster Technik in der Lage das Dual-Fuel-Brennverfahren abzubilden und bietet eine präzise Messwerterfassung, die eine vollumfängliche Analyse gewährleistet. Die entsprechende Regelungstechnik ermöglicht außerdem einen konstanten Motorbetrieb mit separater Parametervariation zur Beurteilung jeglicher Einflüsse auf das Brennverfahren. Beginnend bei der Bereitstellung der angesaugten Ladeluft, können hierdurch die Verwendung von zwei Kompressoren Eingangsdrücke von bis zu 8,5 bar erreicht werden. Das für das Luft-Gas-Gemisch bereitzustellende Erdgas wird direkt aus dem Stadtnetz entnommen. Während des Projektes wurde der Brenngaspfad um eine regelbare Mischstrecke erweitert, die das in den Brennraum eingebrachte Brenngas auf eine gleichbleibende Qualität konditioniert. Die Mischstrecke kann weiterhin dazu genutzt werden um das Grundgas wahlweise mit Kohlenstoffdioxid und/oder Propan anzureichern und so global auftretende LNG-Eigenschaften (bspw. Methanzahl, Heizwert) abzubilden. Außerdem kann die Diesel-Zündmenge dank eines Common-Rail-Systems (Spitzendruck  $\leq 2.200$  bar) in ihren Eigenschaften, wie bspw. Einspritzdruck, -zeitpunkt oder -menge, variiert und kurbelwellenunabhängig in den Brennraum eingebracht werden. Dadurch ergibt sich ein hohes Forschungspotential zur optimierten Anwendung des Dual-Fuel-Brennverfahrens. Die Drehzahlregelung des Aggregates wird von einer 4-Quadrantenmaschine übernommen, die zum einen den Leerlauf vor Einbringung des Kraftstoffes realisiert und weiter-

hin im laufenden Betrieb verschiedene Lastszenarien nachbildet. Üblicherweise wird der Versuchsträger bei einer Festdrehzahl von  $720 \text{ min}^{-1}$  auf der Generatorkennlinie betrieben. Zur Beurteilung des jeweiligen Einspritz-Setups wird neben der Bewertung des indizierten Wirkungsgrades eine vollumfängliche Analyse des ausgestoßenen Abgases mittels eines in der Motorenindustrie weitverbreiteten FTIRs durchgeführt.

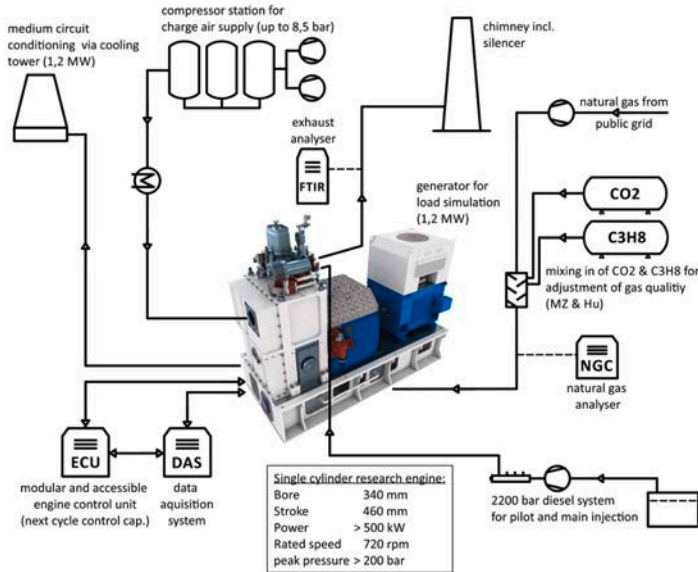


Abb. 3: Übersicht der Infrastruktur des Prüfstandes

### 3. INNOVATIONEN INNERHALB DES PROJEKTES

Im Laufe des Projektes wurden eine Reihe von technischen Neuerungen am Prüfstand umgesetzt und die Infrastruktur um diverse Peripherien erweitert. Durch die Realisierung dieser Systeme konnten angestrebte Projektziele unmittelbar umgesetzt und das Brennverfahren noch detaillierter analysiert werden.



#### Flexible Camshaft Technology

- › Stufenlose Verstellbarkeit für Steuerzeiten von Ein- und Auslassventilen in einem über eine Exzenterwelle vorgegebenen Verstellbereich
- › Zur Realisierung unterschiedlich ausgeprägter Miller-Zyklen im laufenden Motorbetrieb



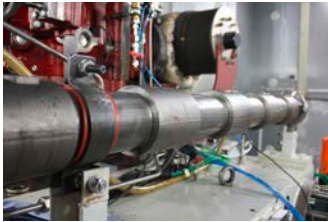
### Gasmischstrecke

- › Bereitstellung mittlerer Gasqualitäten für gleichbleibende Randbedingunge
- › Zumischung von Propan und Kohlenstoffdioxid zur Nachbildung global auftretender LNG-Qualitäten (Methanzahl, Heizwert)
- › Grundgas wird dem Städtnetz entnommen



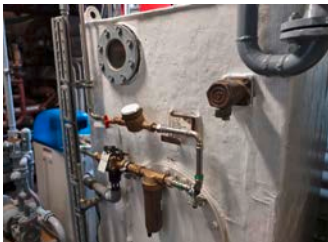
### Gaschromatograph

- › Analyse der dem Forschungsmotor zugeführten Brenngasqualität
- › Kombiniert mit Softwaretool zur Berechnung der notwendigen Zudosieraten für stetige Randbedingungen



### CR-System für Piloteinspritzung

- › Wide-Range-System zur Abbildung von Pilot- (Dual Fuel-Betrieb) bis zu Volllastmengen (konventioneller Dieselbetrieb)
- › Bis zu 2.200 bar Einspritzdruck
- › Durch Anpassung des Zylinderkopfes variable Lage des Pilotinjektors möglich (dezentral/zentral)



### Ladluftbefeuchtungssystem

- › Geregelte Befeuchtung der angesaugten Ladluft
- › Nachbildung weltweiter Feuchtgrade der Umgebungsluft
- › Eindüsung von überhitztem Wasserdampf in bestehende Ladluftinfrastruktur



### Brennumraumvariation

- › Simulation und experimentelle Analyse von Kolbenkronenvarianten für verbesserte Gemischumsätze
- › Variation der Drallzahl durch speziellen Drallkopf
- › Untersuchung von Flügelventilen zur verbesserten Gemischhomogenisierung



### Optimierung der Engine Control Unit

- > Regelung für automatisierten Fahrbetrieb
- > Erweiterung der FCT-Steuerung um stufenlose Verstellbarkeit
- > Einbindung eines laserbasierten Ventilhubkurvenmesssystems

## 4. OPTIMIERUNG DES BRENNVERFAHRENS

### Motorversuche im Dual-Fuel-Gasbetrieb unterschiedlicher Injektorkonzepte

Zur Untersuchung des Einflusses der Injektorposition auf das Brennverhalten und die Emissionsbildung stehen drei verschiedene Zylinderköpfe für den Einzylinder-Forschungsmotor zur Verfügung. Diese erlauben es die Position des Pilotinjektors zu variieren. Der Pilotinjektor hat die Aufgabe das Zündöl in Form eines Pilotsprays für die Zündung des Brenngas-Luft-Gemisches zur Verfügung zu stellen. Die maximal mögliche prozentuale Energiemenge beläuft sich bei den DPI- und ZPI-Konzepten von 0,5 bis 5 %, je nach Einspritzdruck und Ansteuerdauer. Demzufolge ist eine Motorlast von maximal 5 % über diese Pilotinjektoren möglich, ohne dass ein Brenngas eingesetzt wird. Im Falle eines reinen Dieseltreibes dient ein zentral angeordnetes PLD-Einspritzventil (in Abb. 4 gekennzeichnet) dazu, höhere Lasten bis zur Motorvollast zu erreichen. Unter Anwendung eines zentralen Common-Rail Wide-Range-Injektors bestehen unterdessen die Möglichkeiten Dieselmengemengen für den Dual-Fuel-Gas-Betrieb und Dieselmengemengen für den Dual-Fuel-Dieseltreibetrieb zu realisieren und somit aus zwei Einzelsystemen lediglich eines zu verwenden. Abb. 4 zeigt eine schematische Darstellung der Injektorkonzepte.

1. Dezentraler Pilotinjektor (DPI)
2. Zentraler Pilotinjektor (ZPI)
3. Zentraler Wide-Range-Injektor (ZWRI)

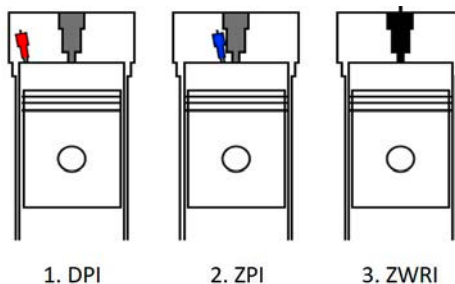


Abb. 4: Schematische Darstellung links: dezentraler Pilotinjektor (DPI); Mitte: zentraler Pilotinjektor (ZPI) und rechts: zentraler Wide-Range-Injektor (ZWRI)

In Tab. 1 sind einige charakteristische Eigenschaften der zu vergleichenden Injektoren dargestellt.

Tab. 1: Charakteristische Injektoreigenschaften

Injektorparameter	Einheit	DPI	ZPI	ZWRI
Anzahl der Spritzlöcher	-	4	4	10
Spritzlochdurchmesser	%	100	109	299
Hydraulischer Durchfluss	%	100	125	2702
verwendeter Einspritzdruck	bar	1.200	1.200	2.200
max. mögliche Zylinderleistung	%	5	5	100

Der Injektorkonzeptvergleich gibt einen Aufschluss darüber, welchen Einfluss die räumliche Einbauposition bei vergleichbaren hydraulischen Durchflüssen (DPI vs. ZPI) aufweist. Des Weiteren dient der Vergleich dazu herauszufinden, ob sich ein deutlich unterschiedlicher hydraulischer Durchfluss bei nahezu gleicher Einbauposition als nachteilig bzw. vorteilhaft erweist (ZPI vs. ZWRI). Über die Einstellparameter am Prüfstand als auch über die durchgeführten Variationen gibt Tab. 2 einen Überblick.

Tab. 2: Überblick der Einstellungen und durchgeführten Messungen zum Injektorkonzeptvergleich

Parameter	Einheit	Wert
Last	%	25
Indizierter Mitteldruck	bar	6,5
Drehzahl	min <sup>-1</sup>	720 (Nenndrehzahl)
Ladedruck	bara	1,25
Methanzahl des Brenngases	-	$84,5 \leq MZ \leq 85,5$
Dieselqualität	-	nach DIN EN 590
Einspritzdruck	bar	1.200, 2.200 (ZWRI)
Dieseinspritzmasse	mg	variiert
Dieseinspritzzeitpunkt	°KWvOT	30

Wie Tab. 2 zu entnehmen ist, wurden im Rahmen des Injektorkonzeptvergleichs Motorlast, indizierter Mitteldruck, Drehzahl, Ladedruck, Methanzahl (MZ) des Brenngases, Dieselqualität und Ansteuerbeginn konstant gehalten. Der Raildruck wurde beim ZWRI gegenüber dem DPI und ZPI von 1.200 auf 2.200 bar angehoben. In Anbetracht der sehr unterschiedlichen hydraulischen Durchflüsse zwischen den Pilotinjektoren und des ZWRI stellt sich ein direkter Vergleich der Einspritzmengen sehr schwierig dar, wie auch Kiesling et. al. in [1] deutlich machten. Daher wurden hier die absoluten Einspritzmengen durch die Anzahl der Düsenspritzlöcher der jeweiligen Injektoren geteilt, um die Einspritzmengenvariation vergleichbar zu machen. Aufgrund der zehn Düsenspritzlöcher am ZWRI beträgt die absolute Einspritzmenge pro Schuss das 2,5-fache gegenüber den Pilotinjektoren mit vier Düsenspritzlöchern.

In Abb. 5 sind das Verbrennungsluftverhältnis (Lambda) der Zündverzug, der Brennbeginn (A5), die Verbrennungsschwerpunktlage (A50) und die Brenndauer über die eingespritzten Dieselmengen pro Spritzloch (SL) dargestellt. Im Hinblick auf Lambda ist erkennbar, dass der DPI und der ZWRI bis zu einer Einspritzmenge von 11 bis 18 mg pro Spritzloch stetig unterhalb des ZPI liegen. Das liegt darin begründet, dass dem Motor zum Halten des Mitteldrucks bei gleichem Ladedruck mehr Brenngasmenge zugeführt werden muss. Nachdem die Zündung des Brenngas-Luft-Gemisches bei gleichem Ansteuerbeginn initialisiert wurde, verlängert sich die Brenndauer beim DPI durch längere Flammenwege und beim ZWRI anfangs durch eine zu hohe Spray-Ausdünnung infolge einer sehr geringen Einspritzmenge/SL. Ab etwa 18 mg Einspritzmenge/SL liegen ZPI und ZWRI auf einem Niveau. Während der Zündverzug und der Brennbeginn beim DPI und ZPI über die gesamte Variation auf gleichem Niveau liegen, zeigt der ZWRI bis etwa 16 mg einen längeren Zündverzug und späteren Brennbeginn. Bei höheren Einspritzmengen hingegen kehrt sich der Verlauf um, sodass die Zündung bis zu 3 °KW früher einsetzt. Ab der Zündung beschleunigt sich die Verbrennung bis zum Brennende, sodass sich die Brenndauer beim ZWRI im Vergleich zum ZPI um bis zu 7 °KW verkürzt. Hierbei zeigt sich, dass eine Anhebung der absoluten Dieselmenge bei gleichem Ansteuerbeginn einen direkten Einfluss auf eine Verkürzung der Brenndauer hat, da sich Grochowina [2] zufolge mehr Zündorte bei einer erhöhten Dieselmenge ausbilden. Darüber hinaus ist die Anzahl der Spraykeulen, bedingt durch die Anzahl der Spritzlöcher beim ZWRI um den Faktor 2,5 höher, was ebenso für eine höhere Anzahl an Zündorten spricht.

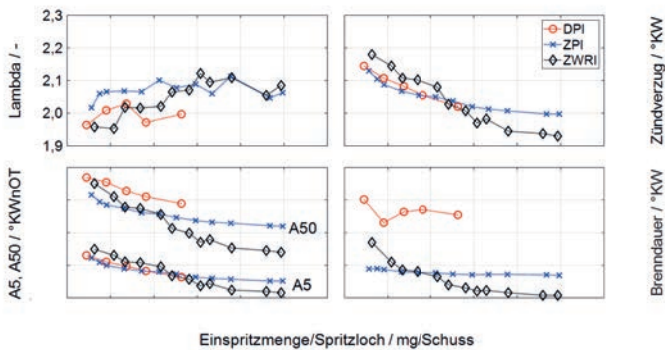


Abb. 5: Ausgewählte Ergebnisse der Dieseleinspritzmengenvariation für die drei gegenübergestellten CR-Injektoren bezogen auf Spritzlochanzahl und Zyklus bei  $P_{Cen} = 25\%$

Das Verbrennungsluftverhältnis sowie die zuvor beschriebenen vorteilhaften Verbrennungsparameter spiegeln sich im indizierten Wirkungsgrad wider. Über den gesamten Variationsbereich sind deutliche Wirkungsgradvorteile beim ZPI ersichtlich. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Klopfintensität mit steigender Einspritzmenge bei allen Injektorkonzepten ansteigt. Entgegen der Erwartung und aufgrund der absolut höheren Einspritzmenge zeigt sich, dass der ZWRI im Vergleich zum DPI und ZPI eine geringere Klopfintensität aufweist. Bei Betrachtung der  $NO_{xi}$ -Emissionen ist bei allen Injektorpositionen ein klarer Zusammenhang zu erkennen. Hohe Einspritzmengen führen zu hohen  $NO_{xi}$ -Emissionen und niedrige



Einspritzmengen zu niedrigen  $\text{NO}_{\text{xi}}$ -Emissionen. Während die  $\text{NO}_{\text{xi}}$ -Emissionen beim DPI und ZPI bei steigenden Einspritzmengen einen nahezu linearen Anstieg aufweisen, zeigt der ZWRI einen eher S-förmigen Verlauf. Bis etwa 18 mg Einspritzmenge pro Spritzloch liegen die  $\text{NO}_{\text{xi}}$ -Emissionen beim ZWRI noch unterhalb von DPI und ZPI. Darüber hinaus steigen die  $\text{NO}_{\text{xi}}$ -Emissionen deutlicher an. Im Vergleich der  $\text{CH}_{4\text{i}}$ -Emissionen sind Nachteile bei der dezentralen Injektorposition über den gesamten Variationsbereich ersichtlich. Der ZPI zeigt hier einen linearen, verhältnismäßig niedrigen Verlauf. Während beim DPI aber auch beim ZPI kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den  $\text{NO}_{\text{xi}}$ - und  $\text{CH}_{4\text{i}}$ -Emissionen ersichtlich wird, ist beim ZWRI ein klarer  $\text{NO}_{\text{xi}}$ - $\text{CH}_{4\text{i}}$ -Trade-Off zu erkennen. Der Schnittpunkt zwischen dem ZPI und dem ZWRI liegt wiederum bei etwa 19 mg Einspritzmenge pro Spritzloch.

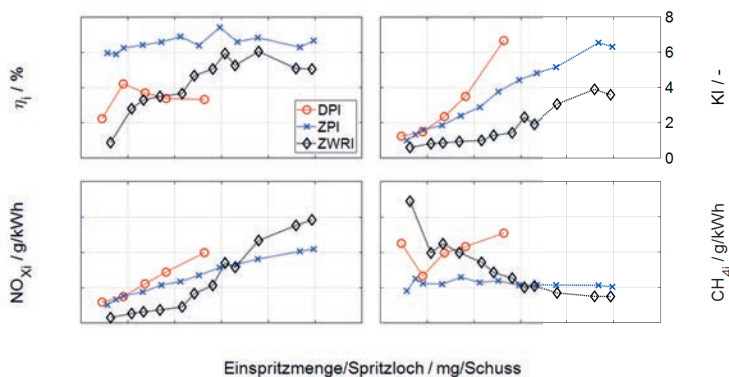


Abb. 6: Ausgewählte Ergebnisse der Dieseleinspritzmengenvariation für die drei gegenübergestellten CR-Injektoren bezogen auf Spritzlochanzahl und Zyklus bei  $P_{\text{Gen}} = 25\%$

Der Variationskoeffizient des indizierten Mitteldruckes ( $\text{VK}_{\text{pmi}}$ ) als Maß für die Brennstabilität liegt beim ZPI über den gesamten Variationsbereich auf einem niedrigen Niveau, während der DPI auch bei steigender Pilotmenge den Wert von 5 % nicht unterschreitet. Beim ZWRI setzt sich der wie zuvor beschriebene Trend der Verbrennungscharakteristik fort. Bei niedrigen Einspritzmengen liegt die Brennstabilität bei über 9 %, welche sich mit steigender Einspritzmenge deutlich verbessert.

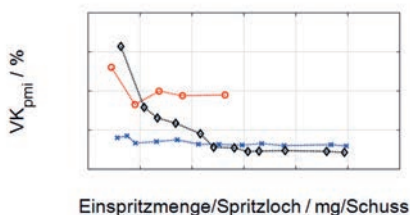


Abb. 7:  $\text{VK}_{\text{pmi}}$  über die Einspritzmengenvariation bezogen auf Spritzlochanzahl und Zyklus für die drei gegenübergestellten CR-Injektoren bei  $P_{\text{Gen}} = 25\%$

Zusammenfassend gibt der Injektorkonzeptvergleich einen Aufschluss darüber, dass:

- › eine dezentrale Injektorposition eher nachteilig gegenüber einer zentralen Position hinsichtlich Brenndauer, Wirkungsgrad, Klopfintensität und Emissionen ist.
- › ein ZPI bei einer Variation der Einspritzmenge ein sehr konstantes Betriebsverhalten aufweist und somit stabil auf äußere Einflüsse reagieren kann.
- › ein zentral positionierter Wide-Range-Injektor ein sehr großes Potenzial für einen Einsatz in Dual-Fuel-Brennverfahren besitzt. Die Brenndauer wird mit steigender Einspritzmenge kürzer gegenüber dem ZPI, wenn auch der Wirkungsgrad in dieser Variation etwas schlechter liegt. In Richtung Klopfintensität sind deutliche Vorteile erkennbar und die Emissionen liegen in mittleren Einspritzmengenbereichen auf dem Niveau des ZPI.

### Motorversuche im Dual-Fuel-Gasbetrieb mit variierenden Gaszusammensetzungen

Auf Basis des optimierten Injektorkonzeptes konnte eine Analyse des Brennverhaltens unter Einsatz schwankender Gasqualitäten erfolgen. Das hierfür genutzte Hardware-Setup des Pilotdiesel-Systems entspricht dabei keinem Serienstand. Zum Einsatz kam ein Wide-Range-Injektor mit einer für verhältnismäßig kleine Pilotmengen optimierten Einspritzdüse.

Bislang operieren die in der Marine genutzten Dual-Fuel-Motoren noch überwiegend in festen Anwendungsgebieten. Daher besteht für sie die Möglichkeit weitestgehend gleichbleibende Gasqualitäten an festen Stationen zu bunkern und sie herstellerseitig für einen bestimmten Gasqualitätsbereich zu optimieren. Dies geschieht bislang zumeist über spezifisch angepasste Steuergerätemappings und hardwareseitige Anpassungen des Verdichtungsverhältnisses. Bei einem weltweiten Einsatz mit häufig wechselnden Bunkerorten müssen durch dieses Vorgehen jedoch Wirkungsgrad- und Emissionsnachteile in Kauf genommen werden. Daher war es das Ziel des Vorhabens einen möglichst weiten Gasqualitätsbereich mit einem gleichbleibenden Hardware-Setup nutzbar zu machen. Dem verwendeten hardware- und softwareseitigen Pilotzündsystem kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Die Analyse der global auftretenden LNG-Qualitäten ergibt dabei einen Schwankungsbereich der Methanzahl von 65 bis 100 [3, 4]. Diese Schwankungen entstehen dadurch, dass das Erdgas nahezu unaufbereitet am Förderort verflüssigt wird und dabei von Quelle zu Quelle starke Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung vorliegen. Methan bildet jedoch immer den Hauptbestandteil. Die Methanzahl ist ein Maß für die Klopfestigkeit von Brenngasen ( $MZ_{H_2} = 0$ ;  $MZ_{CH_4} = 100$ ).

Anders als bei Dieselmotoren verlagert sich die Schwerpunktzone der Verbrennung (A50) nicht immer parallel mit einer Verschiebung des Einspritzzeitpunktes der Dieselmenge. Insbesondere hin zu Einspritzlagen nahe des Oberen Totpunktes tritt verstärkt klopfende Verbrennung auf (s. Abb. 8).

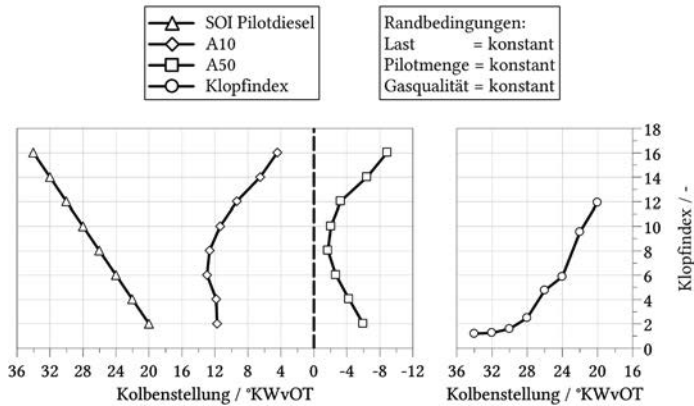


Abb. 8: Schematische Darstellung des Einflusses einer Verschiebung des Einspritzzeitpunktes der Pilotdieselmengen beim ND-Dual-Fuel-Brennverfahren

Da dieses Motorklopfen auch bereits innerhalb weniger Arbeitsspiele zu starken Schäden führen kann, muss es überwacht und reglementiert werden. Am Versuchsträger erfolgte die Bestimmung der Klopfintensität über ein separates Klopfkennungsmodul, welches das Zylinderdrucksignal kurbelwinkelaufgelöst analysiert. Werden im Messbetrieb definierbare Schwellwerte gerissen, wird zunächst die Gasmenge reduziert und falls notwendig die gesamte Brennstoffzufuhr (Gas und Diesel) unterbrochen. Hierbei handelt es sich aber lediglich um eine Sicherheitseinrichtung. Die im Forschungseinsatz untersuchten Klopflevel liegen oberhalb der im Serieneinsatz zulässigen Werte. Kommt es nun im Betrieb gleichzeitig zu einer Verschlechterung der Brenngasqualität werden die im Feld befindlichen Motoren in ihrer Leistung gedrosselt, bzw. der Zündzeitpunkt verschoben. Dieses Verhalten ist selbstverständlich anwenderseitig unerwünscht und kann prinzipiell durch die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Gegenmaßnahmen beeinflusst werden.

Tab. 3: Einflussgrößen auf Brenneigenschaften bei schwankenden Gasqualitäten

	Folgender Zyklus	Wenige Sekunden	Wenige Minuten
Piloteinspritzzeitpunkt	✓		
Pilotmenge	✓		
Piloteinspritzdruck		✓	
Pilotstrategie	✓		
Ventilsteuerzeiten		✓	
Variable Verdichtung		✓	
Ladelufttemperatur			✓
Ladeluftmenge (Lambda)		✓	

Anhand der Zeitskalen ist bereits ersichtlich, dass sich einige Maßnahmen für die unmittelbare Einflussnahme auf zyklische Schwankungen eignen, andere wiederum eher dazu geeignet scheinen globale Veränderungen abzufangen, die sich über einen längeren Zeitraum

ergeben. Soll der Motor weiterhin möglichst wirkungsgrad- und emissionsoptimal betrieben werden, muss eine Betriebsstrategie entwickelt werden, mit der der Grenzbereich hin zur klopfenden Verbrennung angenähert werden kann. In Abb. 9 ist der Einfluss eines gesteigerten Propananteils im dem Motor zugeführten Brenngas dokumentiert. Dazu wurde der Motor in einem Teillastpunkt betrieben und anschließend die Methanzahl durch Anpassung der Zumischung von Kohlendioxid und Propan schrittweise abgesenkt. Ziel war es, den Lastpunkt stabil zu halten und möglichst wenige Eingriffe am Motor vorzunehmen. So wurde beispielsweise der Ansteuerbeginn (SOC = Start of Current) des Pilotinjektors für eine konstante Schwerpunktlage (A50) der Verbrennung nachgeführt.

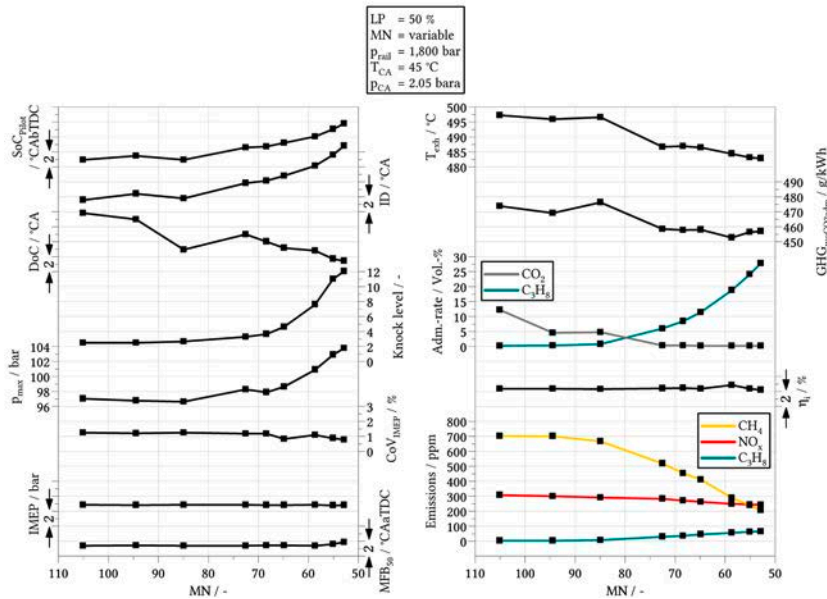


Abb. 9: Veränderung der Verbrennung bei Variation der Methanzahl

Es ist zu erkennen, dass die MZ infolge der Zumischung des Propan signifikant abnimmt. Während der ersten Messpunkte (bis ca. 5 Vol.-% Propan) sind die Auswirkungen auf die Verbrennung noch gering. Die Absenkung der MZ scheint von der gleichzeitigen Abnahme der Brenndauer kompensiert zu werden, sodass zunächst kein Anstieg des Klopfens auftritt. Ab Propananteilen von etwa 10 Vol. % wird die Verbrennung jedoch deutlich beschleunigt. So nimmt die Brenndauer ab, während Spitzendrücke und Klopfindex steigen. Dieses Verhalten ist so zu erwarten und anhand der höheren Flammgeschwindigkeiten und Reaktivität von Propan gegenüber Methan erklärbar [5].

Innerhalb des Vorhabens LEDF2 wurden auf einer identischen Motorkonfiguration Brenngase mit Methanzahlen von 105 bis 65 gefahren, einzelne Laststufen auch mit MZ = 55. Die global auftretenden Qualitätsunterschiede konnten somit abgebildet werden. Zusätzlich wurde vollständig verdampftes Propan (nach DIN 51622) als Brenngas genutzt (MZ = 34) [6]. Die nachfolgende Abb. 10 zeigt einen Auszug der Ergebnisse. Ziel war es ohne

Eingriffe in die Motorhardware einen möglichst emissionsarmen und wirkungsgrad-optimalen Betrieb ohne unzulässig starke Klopfereignisse zu realisieren.

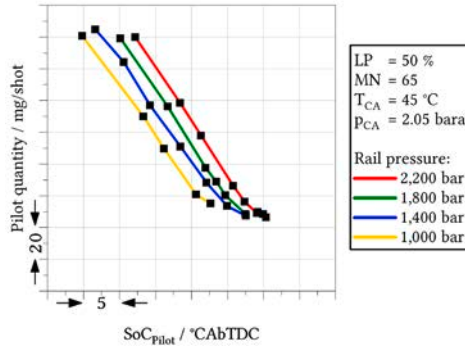


Abb. 10: Raildruck- und Pilotmengenvariation bei konstantem A50 (= 6,5 °KWnOT) und daraus resultierendem SOC (Start of Current) des Pilotkraftstoffes bei 50 % Motorlast

Dargestellt sind insgesamt vier Messreihen, die jeweils bei einer MZ von 65 aufgenommen wurden. Jede Messreihe wurde bei einem unterschiedlichen Raildruck des Pilotkraftstoffes durchgeführt. Innerhalb einer Messreihe wurden alle Randbedingungen konstant gehalten, sodass die Auswirkung einer veränderten Pilotkraftstoffmenge klar ersichtlich wurde. Damit die Betriebspunkte untereinander vergleichbar bleiben, wurde über eine Anpassung des Einspritzzeitpunktes (SOC = Start of Current) die Schwerpunktlage der Verbrennung (A50) konstant gehalten.

Die Auswirkungen dieser Vorgehensweise lassen sich separat für jede Messreihe einzeln darstellen. Ein Gesamtüberblick wird jedoch erst über eine kennfeldbasierte Darstellung in Muscheldiagrammen ermöglicht. Die nachfolgenden Abbildungen stellen daher jeweils über die Farbskala die verbrennungsrelevanten Größen über dem SOC und der Pilotmenge dar. Aus motorischer Sicht lassen sich für einige Größen Limits definieren ober- oder unterhalb dieser ein Betrieb nicht sinnvoll erscheint. Dies sind z. B. der Klopfwert, unzulässig hohe NO<sub>x</sub>- oder CH<sub>4</sub>-Emissionen, aber auch zu hohe Pilotkraftstoffanteile, welche betreiberseitig ggf. aufgrund zu hoher Betriebskosten unerwünscht sein könnten. Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei stark klopfenden Brenngasen eher mittelhohe Pilotmengen und hohe Raildrücke angestrebt werden sollten, da sich in diesem Bereich die besten Kompromisse hinsichtlich der Zielgrößen erreichen lassen. Dieses Verhalten war bei den anderen untersuchten Lastpunkten qualitativ gleichwertig zu beobachten.

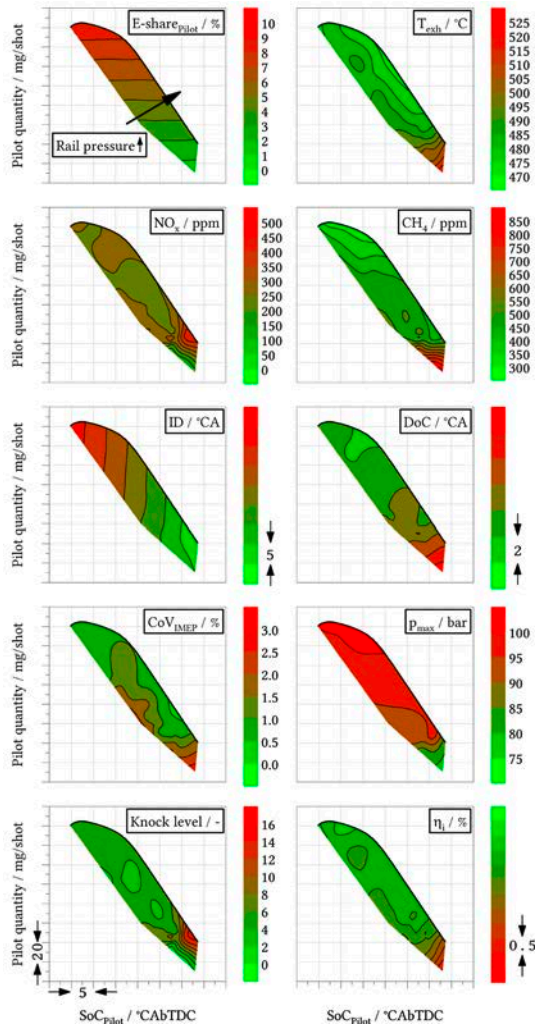


Abb. 11: Kennfeldvergleich einer Raildruck- und Pilotmengenvariation bei 50 % Motorlast und einer Methanzahl von 65

### Simulationsgestützte Brennverfahrenentwicklung

Parallel zu den am Versuchsmotor durchgeführten Untersuchungen wurden 3D-CFD Motorprozesssimulationen zur Variation der Brenngaszusammensetzung durchgeführt. Dazu wurden in einem ersten Schritt entsprechende Hilfsmodelle für thermodynamische Stoffdaten, Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten und Reaktionskinetiken generiert und miteinander gekoppelt. Die Verbrennung wurde dazu mithilfe von Polynomen im NASA-Format [7] nachgebildet und mit experimentellen Literaturdaten [8,9] verschiedener Mischungs- und Zusammensetzungen validiert. Insbesondere für die zeitintensive Simulation der Reaktionskinetiken wurde ein Tabellierungsverfahren angewandt, dass mit der kommerziellen Software AVL Fire umgesetzt und mit Hilfe weniger Kontrollgrößen auf die entsprechenden

Reaktionsmechanismen von einer im Vorfeld berechneten Tabelle zurückgeführt wurde. Die dafür benötigten Rand- und Anfangsbedingungen wurden aus bereits angefertigten OD/1D-Motorprozessrechnungen übernommen. Zur Validierung des Gesamtmodells wurden die Ergebnisse auf Basis der im Projekt durchgeführten Realversuche mit schwankenden Gaszusammensetzungen verglichen. Ausschlaggebend waren dabei die Druckverlaufskurven innerhalb des Brennraumes, da diese auch auf experimenteller Ebene hochaufgelöst gemessen werden können. Hier konnten sehr gute Übereinstimmungen von Simulation und Experiment erzielt werden, sowohl für anfangs definierte Referenzpunkte, als auch für weiterführende Variationen von Verbrennungsparametern, wie der Einspritzzeitpunkt der Pilotmenge oder das Setzen einer Mehrfachpiloteinspritzung.

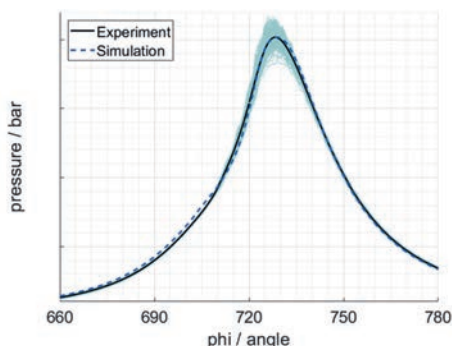


Abb. 12: Vergleich experimenteller Ergebnisse mit einer Simulation für den Referenzlastpunkt

Des Weiteren wurden über 3D-CFD-Variantenbestimmungen diverse Berechnungen zur Identifikation von Optimierungspotentialen betreffend des Brennverfahrens durchgeführt. Ein essentieller Ansatzpunkt ist dabei die Position des Pilotinjektors und die entsprechende Einbringung der Zündmenge an flüssigem Dieselmotorkraftstoff im Brennraum. Untersucht wurden hierbei der Unterschied zwischen zentraler und dezentraler Lage unter Berücksichtigung verschiedener Düsengeometrien. Dabei wurde festgestellt, dass eine zentrale Anordnung Vorteile mit sich bringt, da es zu einer gleichmäßigen, zentral ausgelösten Zündung kommt. Bei der dezentralen Variante kommt es zu mehreren gleichzeitigen Flammenausbreitungen im Randbereich des Brennraumes, die sich negativ auf die Verbrennung auswirken, da sie sich aufeinander zu bewegen und dadurch eine klopfende Verbrennung begünstigen.

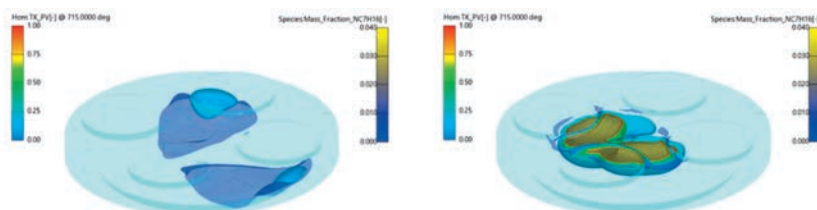


Abb. 13: Vergleich der Simulation von dezentraler und zentraler Injektorposition. Darstellung der Isoflächen von Pilotkraftstoff-Umsatz und Reaktionsfortschritt, dezentraler 2-Loch-Injektor (links), zentraler Injektor (rechts)

Komplettiert wurden die simulativen Betrachtungen mit der Untersuchung des Einflusses variieren-der Brennraumgeometrien. Zum einen wurden im Laufe des Projektes durch den Projektpartner Kolbenschmidt GmbH drei weitere Kolbenkronenvarianten gefertigt, die mittels numerischer Gitterstrukturen an das Verbrennungsmodell angepasst wurden. Im Vergleich zur Serienkrone konnte in den Referenzpunkten keine nennenswerten Vorteile aufgezeigt werden, da es zu längeren Brenndauern bzw. Zündverzügen kommt. Allerdings begünstigen diese Varianten einen schnelleren Energieumsatz, was mit einer Anpassung des Einspritztimings wiederum Wirkungsgradvorteile mit sich bringen könnte. Mit Hilfe dieser Erkenntnis wurden alle Kolbenvarianten mit einem modifizierten Zylinderkopf untersucht, der einen erhöhtes Drallverhalten der Ansaugluft (Swirl) erzeugt. Hier konnte gezeigt werden, dass die zusätzliche Turbulenz im Brennraum direkten Einfluss auf das Eindringverhalten des Pilotstrahl mit sich bringt, was ebenfalls zu einer Verlängerung des Zündverzuges führt. Auch hier konnte also kein wesentliches Potential zur Brennverlaufsoptimierung aufgezeigt werden.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes LEDF-Konzepte 2 wurden unterschiedliche Forschungsansätze erfolgreich umgesetzt, um das Dual-Fuel-Brennverfahren besser zu verstehen und zu optimieren. Im Hinblick auf die Pilotzündung wurden unterschiedliche Einspritzkonzepte miteinander verglichen und eine Optimierung durch die zentrale Lage des Injektors oberhalb des Brennraumes nachgewiesen. Prädestiniert ist hierbei die Variante des zentral angeordneten Wide-Range-Injektors, da dieser die Verbrennungscharakteristik positiv beeinflusst. Außerdem wurden global auftretende Qualitätsunterschiede des Brenngases auf das Brennverfahren mithilfe der neu konzipierten Gasmischstrecke nachgebildet. Hier konnten unter Beibehaltung der Hardwarekonfiguration des Motors stabile, emissionsarme und wirkungsgradoptimierte Betriebsbereiche definiert werden. Diese Erkenntnisse konnten auch auf simulativer Ebene bestätigt werden.

Als Fortführung der Dual-Fuel-Forschung auf dem Versuchsträger in Rostock konnte gemeinsam mit der Industrie das Vorhaben „TEME2030+“ erfolgreich gestartet werden. Dieses legt den Fokus auf die strikte Reduktion der Methanemissionen, um so das THG-Reduktionspotenzial von LNG aufzuzeigen. Als Technologien kommen dabei nicht nur retrofitgeeignete Ansätze wie z.B. Methankatalysatoren zum Einsatz, sondern auch direkt einblasende Brennverfahren mit mittlerem und hohem Gasdruck.

## DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung des Projektes „LEDF-Konzepte 2“ (Projektnummer: 03SX421) bedanken.

Darüber hinaus gilt unser Dank den Projektpartnern FVTR GmbH und dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) der Universität Rostock, sowie den assoziierten Projektpartnern Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG, Schaller Automation GmbH & Co. KG, Kompressorbau Bannewitz GmbH und KS Kolbenschmidt GmbH für die Unterstützung des Projektes.



## LITERATUR

- [1] Kiesling, Constantin; Redtenbacher, Christoph; Kirsten, Martin; Wimmer, Andreas; Imhof, Dino; Berger, Ingmar; Garcia-Oliver, Jose M.: Detailed Assessment of Advanced Wide Range Diesel Injector for Dual Fuel Operation of Large Engines: Paper No. 78. In: CIMAC Congress 2016. Helsinki, Finland, 06.-10. Juni 2016
- [2] Grochowina, Marcus: Dieselpilotzündung in Dual-Fuel-Diesel-Gasmotoren: TU München, Dissertation. München: Universitätsbibliothek der TU München, 2020 <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1523190/document.pdf>
- [3] ISO, „ISO 23306:2020(E): Specification of liquefied natural gas as a fuel for marine applications“, 2020-10.
- [4] GIGNL, „The LNG Industry: GIGNL Annual Report 2016 Edition“, 2016.
- [5] Joos, Franz: Technische Verbrennung - Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006 - ISBN-10 3-540-34333-4
- [6] H. Tschöke, K. Mollenhauer und R. Maier, Handbuch Dieselmotoren. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- [7] McBride, Bonnie J. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species. Vol. 4513. NASA Langley Research Center, 1993.
- [8] Andree, S., Ritzke, J., Theile, M., Henke, B., Schleaf, K., Fink, C., Nocke, J., Hassel, E.: "Modellierung und Simulation eines Dual-Fuel Schiffsmotors mit Hilfe kombinierter 0/1- und 3-dimensionaler Ansätze", VDI Thermodynamik-Kolloquium 2016, 05.10 - 07.10.2016, Kaiserslautern, Deutschland.
- [9] D. Healy, H.J. Curran, S. Dooley, J.M. Simmie, D.M. Kalitan, E.L. Petersen, G. Bourque; Methane/Propane Mixture Oxidation at High Pressures and at High, Intermediate and Low Temperature



# MODIFIABLE UNDERWATER MOTHERSHIP (MUM)

ERARBEITUNG EINER MEERESTECHNISCHEN SYSTEMLÖSUNG FÜR AUTONOME UNTERWASSER-ARBEITEN

## AUTOREN

<b>JÖRG KALWA</b>	ATLAS ELEKTRONIK, BREMEN
<b>DR. RAMONA STACH</b>	ATLAS ELEKTRONIK, BREMEN
<b>DR. RUDOLF BANNASCH</b>	EVOLOGICS, BERLIN
<b>DR. EUGEN OLENEW</b>	EVOLOGICS, BERLIN
<b>WILLEM HENDRIK WEHNER</b>	THYSSENKRUPP MARINE SYSTEMS, KIEL
<b>NICOLAS RICHTER</b>	THYSSENKRUPP MARINE SYSTEMS, KIEL
<b>MATTHIAS GOLZ</b>	TU BERLIN, BERLIN
<b>SEBASTIAN RITZ</b>	TU BERLIN, BERLIN
<b>PROF. DR. GERD HOLBACH</b>	TU BERLIN, BERLIN
<b>DR. MARTIN KUROWSKI</b>	UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK
<b>ERIK RENTZOW</b>	UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK
<b>PROF. DR. TORSTEN JEINSCH</b>	UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK

## EINLEITUNG

Als Exportnation benötigt Deutschland große Mengen an Energie und Rohstoffen. Diese werden im 21. Jahrhundert zunehmend in und auf den Ozeanen gesucht. Abseits der Randmeere herrschen jedoch oft raue, schlecht planbare Wetterbedingungen und in der Nähe der Pole macht Eis Offshore-Tätigkeiten ineffizient. Allein die durchschnittliche Wassertiefe der Ozeane von über 3.500m und die damit einhergehenden Umweltbedingungen verdeutlichen die Schwierigkeit, Aufgaben in der Tiefsee auszuführen.

Die Anwendungen reichen von industriell, wie im Bereich Offshore-Energie und Meeresbergbau, bis wissenschaftlich. Das Projekt „MUM – Large Modifiable Underwater Mothership“ zeigt Lösungen auf, wie Aufgaben offshore künftig deutlich effizienter ausgeführt werden können.

Der Leitgedanke des Projekts ist die Konzeptionierung einer neuartigen Fahrzeugklasse. Mit hochmodularen autonomen Unterwasserfahrzeugen wird diese Klasse fähig sein, unterschiedlichste Aufgaben abseits der Wasseroberfläche durchzuführen. Dies wird erreicht durch ein Aufbrechen klassischer Fahrzeugstrukturen in einzelne Basismodule, die zusammen mit speziellen Missionsmodulen zu großen Systemen zusammengestellt werden können. Der Aufbau im Baukastenprinzip erlaubt eine missionskonforme und

-spezifische Zusammenstellung und Anordnung der Module. Das Aufgabenspektrum reicht von Nutzlasttransport und -operationen, über Explorationsmissionen bis hin zu stationären Aufgaben in bis zu 5.000m Wassertiefe. Zu den Basismodulen gehören unter anderem Module zur Navigation, für die Fahrzeugsteuerung, den Antrieb und die Energieerzeugung mit Hilfe einer Brennstoffzelle. Die Entwicklung systemrelevanter Module führt aufgrund deren Wiederverwendbarkeit zu einer drastischen Kostenreduktion und deutlich schnelleren Entwicklungszyklen gegenüber konventionellen Fahrzeugkonzepten. Neu entwickelte Missionsmodule können mit geringem Aufwand integriert werden und eine separate Vermarktung von Einzelmodulen ist möglich.

## 2. KONZEPTION

Die Entwicklungen des MUM Konzepts verfolgen von Anfang an das Ziel, eine möglichst große Bandbreite an unterschiedlichen Unterwasseraufgaben erfüllen zu können. Klassischerweise erfordern verschiedene Aufgaben verschiedenartige Unterwasserfahrzeuge oder -geräte. Mit MUM entsteht ein System, welches vielfältige Anwendungsfelder mit völlig unterschiedlichen Bedarfen in einer „all-in-one“ Lösung bedienen kann. Dieser neuartige Ansatz verspricht künftigen Nutzern viele Vorteile, die im Verlauf des Projekts erhärtet wurden. Damit die Entwicklungen zielgerichtet und in Abhängigkeit der Anforderungen des Marktes erfolgen, wurden in einem ersten Arbeitsprozess potentielle Anwendungsszenarios aus unterschiedlichen Branchen identifiziert. Ausgewertet hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Relevanz und technischen Komplexität wurden die über 20 identifizierten Anwendungsszenarien auf drei repräsentative reduziert. Das darin enthaltene breite Spektrum an Anforderungen dient im weiteren Verlauf als Basis für die Entwicklungen des MUM Systems. Auf Grundlage der definierten Einsatzszenarien ist die einzusetzende Payload definiert worden. Herkömmlicherweise wird auf dieser Basis ein bestehendes Fahrzeug mit einer Nutzlastsektion gewählt, welche mit der spezifischen Nutzlast ausgerüstet und betrieben wird. Hierbei kann es grundsätzlich zu Problemen bei der mechanischen und/oder elektrischen Integration in das Trägerfahrzeug kommen. Beim MUM Ansatz wird daher komplementär vorgegangen. Durch den modularen Aufbau soll das eigentliche Fahrzeug sprichwörtlich um die Nutzlast herum gebaut werden, was letztlich zu einer bestimmten Fahrzeugform führt.

Der Aufbau im Baukastenprinzip erlaubt so die missionsspezifische Zusammenstellung verschiedener Module zu großen Systemen. Auf Grundlage dieses Ansatzes wurde im Verbund das Konzept einer neuartigen Klasse modularer unbemannter Unterwasserfahrzeuge erarbeitet. Dies wird durch ein konsequentes Aufbrechen klassischer Fahrzeugstrukturen erreicht. Damit sollen ebenso eine Diversifizierung von Funktionen und Modulen, d.h. Einzelfunktionen werden genau einem Modul zugeordnet (Modularität), eine Kombination von druckneutralen und druckkörperbasierten Modulen sowie resultierende flexible Fahrzeugstrukturen durch Modul-Rekombinationen einhergehen, wie es die Abb. 1 verdeutlicht.

Weitergehende Informationen finden sich in den Veröffentlichungen der Projektpartner, z.B. [2], [6].

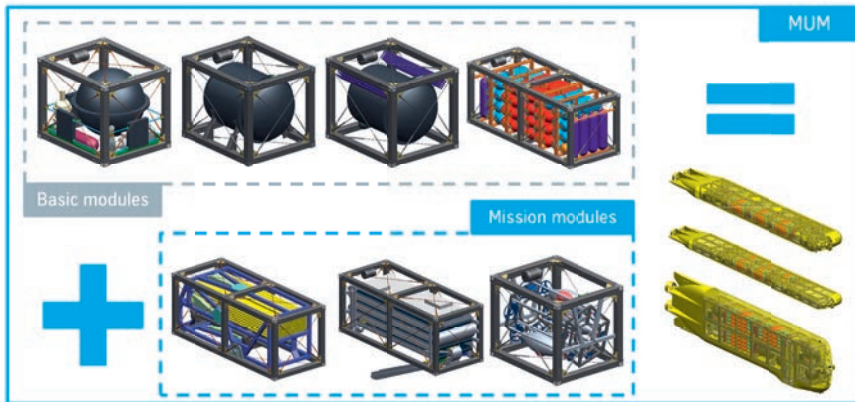


Abb. 1: Baukastenprinzip der MUM Fahrzeuge

Einen neuartigen Ansatz bildet ebenfalls das mobile Navigationssystem zur Positionstützung, das es erlaubt, bei Langzeitmissionen das unvermeidliche Driften des installierten Inertialnavigationssystems zu limitieren. Hierbei transportiert das MUM Fahrzeug einen Schwarm von mobilen hydroakustischen Modems zum Einsatzort. Nach dem automatisierten Aussetzen der einzelnen Systeme, haben diese die Aufgabe ein akustisches Unterwassernetzwerk zur Navigation und Kommunikation mit grob vorgegebener Topologie aufzubauen. Der Schwarm verfügt dabei über Fähigkeiten selbst-organisierend und autoadaptiv die bestmögliche Positionierung und Anordnung zu finden und stellt so eine robuste Kommunikationsverbindung und Abdeckung des Einsatzareals sicher. Sobald das hydroakustische Kommunikations- und Navigations-Netzwerk sich positioniert und eingemessen hat, wird das MUM Fahrzeug mit Absolut-Koordinaten (lokal oder georeferenziert) zur Stützung des internen inertialen Navigationssystems versorgt und verhindert so ein Verdriften. Nach erfolgter Mission docken die mobilen Einheiten im MUM Missionsmodul an.

### 3. ENTWICKLUNG

Im Projekt wurde sowohl Hardware als auch Software entwickelt. Es wurde ein modulares Energiesystem für die Fahrzeuge entwickelt. Dazu wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht. Die gewählte Lösung ist eine PEM-Brennstoffzelle wie sie in ähnlicher Form bereits in U-Booten zum Einsatz kommt. Das MUM Fahrzeug hat jedoch andere Anforderungen an ein Energiesystem als bemannte U-Boote. Entsprechend wurde losgelöst von bestehenden Systemkonzepten Schemen entwickelt, für das Brennstoffzellensystem sowie dessen Peripherie (Kühlung, Spannungswandler etc.). Einen großen Umfang hat dabei auch die Lösung zur Lagerung der Reaktionsgase und Reaktionsprodukte (Wasser) eingenommen. Im Versuchsstand der Brennstoffzelle wurde ein Funktionsmuster der Anlage mit guten Ergebnissen erprobt.

Ökonomisch in großen Tiefen zu arbeiten, stellt bisherige Systeme vor Herausforderungen. Im Projekt wurden Druckkörper für das MUM Fahrzeug entwickelt und die Berechnungsmethode im Druckversuch validiert. Diese betrachtete explizit Druckkörper für bis zu 5.000m Wassertiefe. Mit kleinskaligen Test-Druckkörpern wurden erfolgreich Drucktests an der Hochschule Augsburg durchgeführt, mit denen die Rechenmethode, Fügetechnik und Dichtungen im Versuch validieren wurden. Zudem wurde ein System zum Trimmen des Fahrzeugs und eines zum Ausgleich von Gewichts- und Dichteänderungen entwickelt, z.B. beim Aussetzen und Aufnehmen von Nutzlasten. Für das im Projekt getestete Funktionsmodell des großen MUM Systems wurde eine kleinskalige Version dieser Systeme entwickelt und gebaut. Das sogenannte Regel-, Trimm- und Nutzlastkompensationssystem ist hochkompakt, um die Funktionalitäten auf dem Funktionsmodell darzustellen.

Zur automatisierten Führung von Fahrzeugen ist ein „Framework“ unterschiedlicher autonom arbeitender Funktionsblöcke notwendig. Um das Gesamtsystem in den Hauptkomponenten zu beschreiben, bedient man sich den allgemeinen Funktionen: Guidance (Führung), Navigation und Control (Regelung) – GNC, wobei die Guidance zur Erzeugung von Vorgabewerten für das Regelungssystem, die Navigation zur Ermittlung der (optimalen) Bewegungszustände des Fahrzeuges und die Regelung zur automatischen Bewegungssteuerung dient. Die Gesamtstruktur der Software mit ihren wesentlichen Schnittstellen ist in Abb. 2 dargestellt. Dabei sind auch die verantwortlichen Partner benannt, so dass hier die Zusammenarbeit im Verbundprojekt zum Ausdruck kommt. Die Grafik verdeutlicht aber auch, dass über die Komponenten GNC viele weitere essentielle Module vorhanden sein müssen, die zum Teil auf der Produktentwicklung „AUV SeaCat“ basieren und zur Verfügung gestellt werden konnten. Über die reine „automatische“ Fahrzeugführung hinaus wurden Probleme zur Gewährleistung der Eigen- und Fremdsicherheit großer unbemannter Fahrzeuge adressiert. U. a. wurden umfangreiche Arbeiten zur Diagnose des MUM und seiner Umwelt durchgeführt. Unterpunkte betrafen die

- › Entwicklung von Modulen zur Zustandsbestimmung des Gesamtsystems und zur Fehlerdiagnose auf Geräte- und Systemebene;
- › Erarbeitung eines Konzepts zur Missionsüberwachung und Behandlung von auftretenden Fehlern durch adaptive (reaktive) Missionsumplanung;
- › Entwicklung eines Konzepts zur Umweltwahrnehmung (Hindernisvermeidung bei Tauchfahrt, Sicherheit des Auftauchvorgangs, Anti-Grounding);
- › Entwicklung eines Konzepts für reaktive Methoden zur Hindernisvermeidung.

Übersicht Kommunikationsnetzwerk MUM AUV  
 Funktionsmodell  
 Stand: 16.04.2019

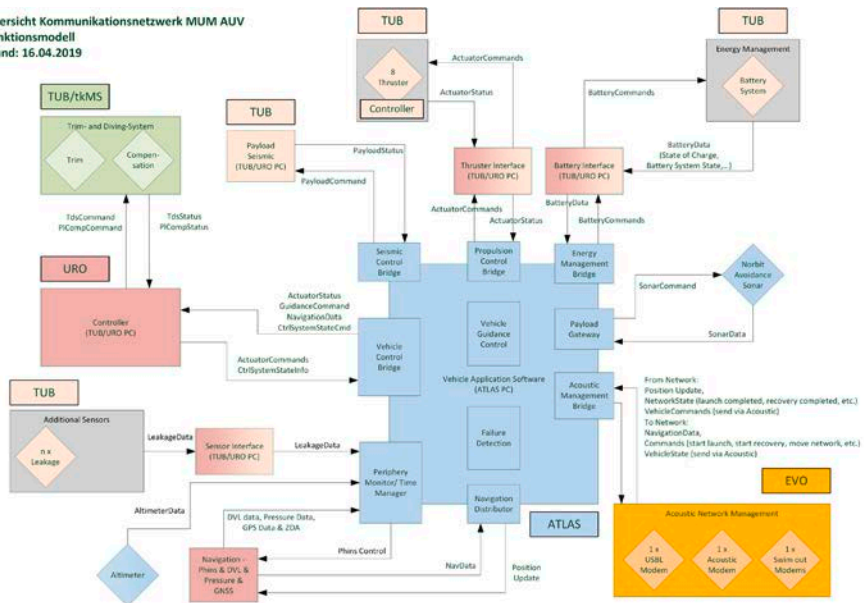


Abb. 2: Vollständige Struktur des MUM Führungssystems in Ausprägung „Funktionsmodell“

Im Hinblick auf die Entwicklung des Steuerungs- und Regelungssystems mussten die Anforderungen der vielfältigen, fahrzeugstrukturabhängigen Operationsszenarien des MUM berücksichtigt werden. Dazu wurden Methoden zur Kombination von Manöver-Regelsystemen (Maneuvering Control) mit dynamischer Positionierung (DP) für Nutzlastoperationen und deren Wechselwirkungen untersucht. Bei dem entstehenden MUM handelt es sich je nach Einsatzzweck um ein verschieden zusammengesetztes Fahrzeug, so dass eine ebenso generische Regelungsstruktur notwendig war. Um unter diesen Randbedingungen einen holistischen Systemansatz zu realisieren, wurde eine hybride Struktur mit einem fahrzeugzustandsbasierten Supervisor gewählt, der die von der Führung erzeugten Referenzen integrativ berücksichtigt. Für die unterschiedlichen Betriebsarten wurden strukturell verschiedene Regler und Parametersätze eingesetzt, um die Anforderungen entsprechend der variierenden Systemdynamik zu erfüllen [7].

Wesentliche Herausforderung zur Ermöglichung eines hohen Automatisierungsgrades im Fahrzeugbetrieb ist die Überwachung der Funktionstüchtigkeit aller Module in Aktorik und Sensorik und die Bereitstellung alternativer Konzepte für den Fehlerfall. In den höheren Automationsstufen müssen Systemfehler oder Leistungsabfälle automatisch erkannt - Fault Detection and Isolation (FDI) - und wenn möglich ausgeglichen werden - Fault Tolerant Control (FTC), um den sicheren Fahrzeugbetrieb aufrecht erhalten zu können. Im Projekt wurde zur Fehlerdiagnose und fehlertoleranten Regelung eine grundlegende Erweiterung der etablierten GNC-Struktur nach Abb. 3 entwickelt. Dabei werden zur Identifikation und Behandlung von verschiedensten Fehlern auf Geräte- und System- sowie auf Manöver- und Missionsebene virtuelle Layer für die verschiedenen Module, wie Sensoren, Aktoren, Planung, etc. erstellt. In diese wurden anschließend das FDI- und FTC-System eingebettet.

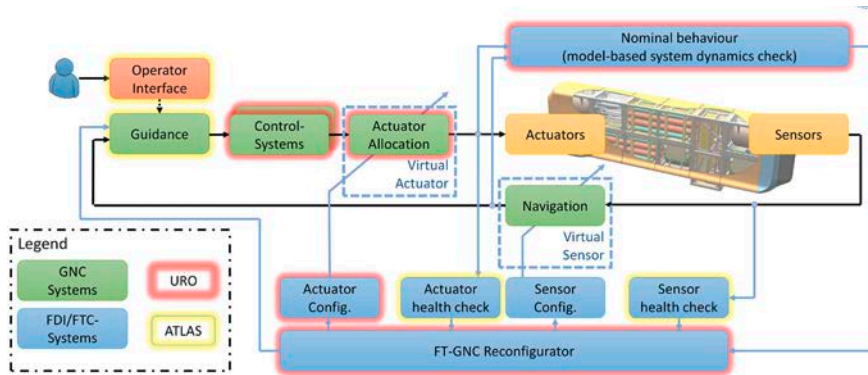


Abb. 3: Struktur eines fehlertoleranten Guidance-Navigation-Control (GNC) Systems

Entwicklungsarbeiten für einzelne Fahrzeugsysteme wurden in Fahrzeugentwürfe zusammengeführt und diese auf Konsistenz mit den aus den Anwendungsszenarien abgeleiteten Anforderungen geprüft. Dies fand in mehreren Iterationsschleifen für die Module statt und es wurden drei MUM Fahrzeugkonfigurationen final bewertet.

Für die Interaktion mit dem mobilen hydroakustischen Netzwerk wurde eine Schwarmführungssoftware entwickelt, welche missionsgesteuert die notwendige Netzwerkfunktion zum richtigen Zeitpunkt abrufft. Eine komplette Softwareumgebung aus Führungssystem, Regelungssystem, Sensorfusion und den einzelnen Spezialfunktionen auf den hydroakustischen Modems auf den Versuchsträgern gewährleistet das Ausführen der einzelnen Abläufe im kooperierenden Schwarmverbund.

#### 4. DEMONSTRATION

Die Demonstration der wesentlichen Bestandteile des MUM Systemansatzes wurde mit dem Funktionsmodell MONIQUE durchgeführt. MONIQUE besteht aus drei Hauptabschnitten - Bug, Hauptkörper und Heck, wie in Abb. 5 (links) dargestellt. Der Hauptkörper besteht aus konfigurierbaren Modulen für die Energieversorgung, die zentrale Fahrzeugintelligenz und die Nutzlast. Mit diesem Aufbau erreicht das Fahrzeug Abmessung von 3,6 m x 1,4 m x 1,1 m und ein Gewicht von ca. 900 kg an Luft. Das Fahrzeug ist mit acht Inline-Thrustern ausgestattet, die in den Bug- und Heckbereich integriert sind. Jedes der drei orangefarbenen Aktormodule umfasst zwei Thruster, die senkrecht zueinander ausgerichtet sind. Sie sind vektorisiert angeordnet, um Schubkomponenten in sechs Freiheitsgraden erzeugen zu können.

Zur Validierung der Entwicklungen wurde eine exemplarische Mission, die alle relevanten Betriebs- und Regelungsmodi abdeckt, im Kieler Hafen geplant und automatisch durchgeführt. Dabei führt das Fahrzeug zuerst ein Mäander-Manöver zur bathymetrischen Vermessung des Bodenreliefs in einer Tiefe von bis zu 10 m durch. Am Ende der Mäanderfahrt stoppt das Fahrzeug auf, um sich in Richtung des Startpunktes zu drehen, während es die Position hält. Anschließend fährt es zu einer DP Position und dreht sich



um 90 Grad, um für eine Strukturuntersuchung 20 m am Schiffsrumpf in einer stabilisierten Tiefe von 3 m entlang zu traversieren. An der finalen Position stoppt das Fahrzeug auf und hält die Position. Die Abb. 5 (rechts) verdeutlicht die automatisch durchgeführte Mission im Vergleich der Vorgabe zu den Navigationsdaten.

Für diese Operationen sind klassischerweise unterschiedliche Fahrzeugtypen einzusetzen. Mit dem MUM Konzept konnte gezeigt werden, dass sich die generischen Ansätze zur automatischen Fahrzeugführung für die Beispielkonfiguration MONIQUE umsetzen lassen und ein zufriedenstellendes Regelergebnis erreicht wird [7].

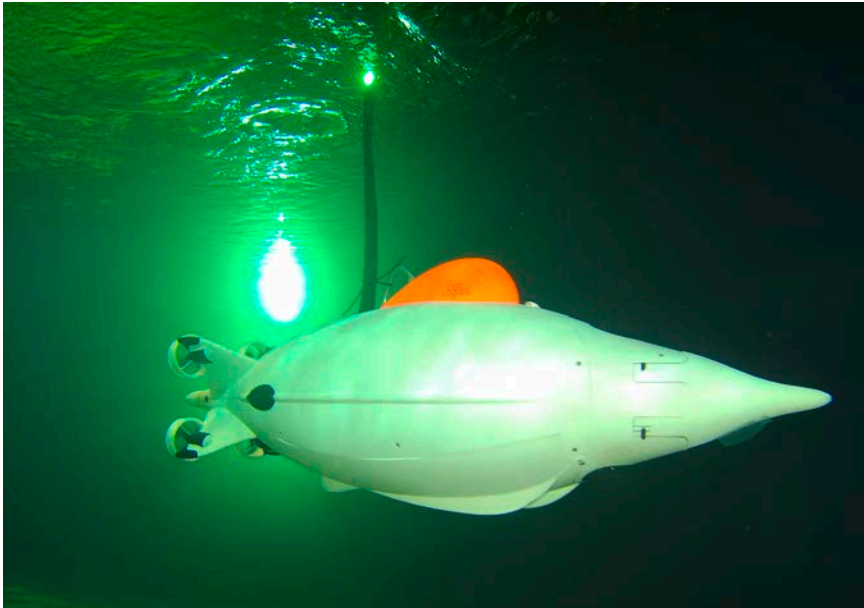


Abb. 4: Selbstfahrender akustischer Netzwerkknoten zur Navigation und Kommunikation des Funktionsmodells MONIQUE

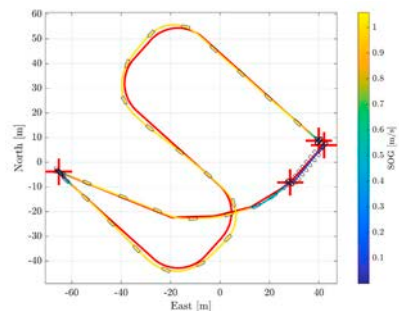
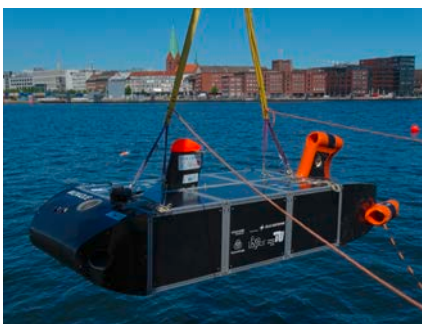


Abb. 5: Betrachtete Grundkonfiguration eines MUM Fahrzeugs als 1:4,2 skaliertes Funktionsmodell namens MONIQUE (links) und Fahrzeugbahn der exemplarischen Mission mit Darstellung des Headings und der Geschwindigkeit über Grund (rechts)

Während der oben dargestellten Mission konnten ebenfalls die beschriebenen Basisfunktionen des mobilen Navigationssystems (Abb. 4) in den Missionsablauf eingebettet und nachgewiesen werden. Neben dem MUM Funktionsmodell Monique wurden für die geforderten Funktionalitäten ausgelegte Versuchsträger aufgebaut und in Betrieb genommen.

Während der Missionsdemo wurde eine Netzwerktopologie durch Vorgabe der Koordinaten für die einzelnen Modems bestimmt. Über das bordeigene akustische Modem baute das MUM Fahrzeug eine Kommunikationsverbindung auf und befahl dem Netzwerk, den Aufbau, das Einmessen, das Aktivieren der Positionsbestimmung, das Rearrangieren und das Wieder-Heimkehren. Die einzelnen Funktionsabläufe konnten als eine aufeinanderfolgende komplexe Abfolge automatisiert im Missionsablauf abgerufen und erfolgreich nachgewiesen werden. Die bereits erreichte Funktionsreife bildet eine vielversprechende Grundlage für die angestrebte Weiterentwicklung der selbstorganisierenden UW-Netzwerke.

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Im Vorhaben MUM wurden neue konzeptionelle Maßstäbe für große unbemannte Unterwasserfahrzeuge gesetzt. Die grundlegenden Merkmale dieser neuen Fahrzeugklasse mit emissionsfreiem Antrieb und keiner Gefährdung von Personal offshore sind heute aktueller denn je. Das interdisziplinäre Team konnte das Projekt im Sommer 2020 mit der erfolgreicheren Demonstration eines Funktionsmodells abschließen. Das im Projekt aufgebaute und demonstrierte Knowhow kommt bereits heute Kunden der Industriepartner zu Gute. Ein Folgeprojekt wird seit Frühjahr 2021 umgesetzt.

## **DANKSAGUNG**

Wir danken allen Ansprechpersonen, die für unsere Ideen immer ein offenes Ohr hatten und für Sichtbarkeit des Projekts gesorgt haben. Das und das Vertrauen des Projektträgers Jülich und Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie hat uns sehr motiviert.

## LITERATUR

- [1] A. Kaschube, et. al., MUM – Large Modifiable Underwater Mother Ship, Conference Paper: Underwater Mining Conference, 2017
- [2] M. Golz, et. al., MUM – Large Modifiable Underwater Mother Ship: Requirements and application scenarios, Conference Paper: OCEANS – MTS/IEEE, 2018
- [3] W. H. Wehner, et. al., Mastering high product variety of an underwater vehicle class in the concept design stage, Conference Paper: OMAE, 2018
- [4] J. Kalwa, et. al., Large Modifiable Underwater Mothership - Operational and technical concepts for complex unmanned tasks, Conference Paper: UTC, 2019
- [5] S. Lack, et. al., Experimental Parameter Identification for an open-frame ROV: Comparison of towing tank tests and open water self-propelled tests, IFAC-PapersOnLine, Volume 52, Issue 21, 2019, pp. 271-276.
- [6] S. Ritz, et. al., Large Modifiable Underwater Mothership: A case study for ocean bottom nodes deployment and recovery, In Proceedings of the Society of Petroleum Engineers (SPE) Offshore Europe Conference and Exhibition, Aberdeen, UK, 2019, pp. 1-13.
- [7] E. Rentzow et. al., Modeling and Control of a Highly Modular Underwater Vehicle with Experimental Results. in Proceedings of the European Control Conference (ECC2021), Rotterdam, Netherlands (Virtual), 2021, pp. 2237-2242.



# INNO-Emaille

EMAILBESCHICHTUNG AUF MARITIMEN FAHRZEUGEN UND AUSRÜSTUNGSGEGENSTÄNDEN UND AUF STATIONÄREN MARITIMOBJEKTEN IM UNTERWASSER- UND DECKSBEREICH DURCH INDUKTIVES AUFSCHMELZEN UND EINBRENNEN

## AUTOR

<b>CARSTEN PAULS</b>	OT OBERFLÄCHENTECHNIK GMBH & CO. KG, SCHWERIN
<b>MICHAEL FUNKE</b>	OT OBERFLÄCHENTECHNIK GMBH & CO. KG, SCHWERIN
<b>BERND MARYNIAK</b>	INNO HEAT GMBH, SCHWERIN

## MOTIVATION

Das Ziel des Projektes bestand in der Entwicklung einer neuartigen Email-Beschichtung (anorganisch) in Kombination mit einer innovativen, auf Induktion basierenden Einbrenntechnologie zur Anwendung für maritime Objekte und Komponenten.

Die neuartige Beschichtung, als auch das Induktionsverfahren sollten eine umweltfreundliche Alternative zum energieaufwendigen Ofenprozess und eine Ablösung bestehender Antifouling-Beschichtungen auf Basis von organischen Farben und Lacken darstellen.

Mit der Beschichtung sollte eine wesentliche Reduktion von Bewuchs und Korrosion erreicht werden. Dies kann bei Schiffen einen deutlich gesenkten Treibstoffverbrauch und damit CO<sub>2</sub>-Ausstoß nach sich ziehen.

Zusätzlich sollte die Beschichtung chemisch inert und somit umwelt-, flora- und faunafreundlich sein.

Anzustreben waren ebenfalls die Punkte:

- › Voll recyclebar bei Einsatz heimischer Rohstoffe
- › Minimierung des Reibungswiderstandes und verbessertem Strömungsverhalten bei schwimmenden Objekten
- › Minimierung von Service- und Wartungsaufwand (einfache Reparatur von Defektstellen in der Schicht oder bei Unfällen/Havarien)
- › Reduzierung von Plastikmüll/Mikroplastik

Aus obigen Punkten ergaben sich folgende Aufgabengebiete:

- › Entwicklung einer passenden Emaille mit schneller Reaktionszeit
- › Entwicklung passender Anlagentechnik und Induktoren
- › Entwicklung einer Apparatur zum gleichmäßigen Bewegen/Manipulieren eines Induktors
- › Die Schicht sollte möglichst dünn und flexibel sein und wenig zusätzliches Gewicht auf das maritime Objekt bringen
- › Beschichtung mit dauerhafter Beständigkeit gegen Schwingungen, Druck-, Zug- Biegekräfte
- › möglichst keine Abrasion von Partikeln der Oberfläche

Projektkronym: MCS – Mineral Coating System

## 2. MATERIALENTWICKLUNG UND TECHNIK

### A: MCS –Materialien

Ausgehend von Emails für Edel- und Schwarzstahl wurden zusammen mit den verschiedenen Emailherstellern und Anwendern praxisbewährte Kompositionen modifiziert und den Gegebenheiten eines induktiven Einbrands angepasst.

Dabei wurde den besonders den maritimen Anforderungen – Korrosion und Fouling große Beachtung geschenkt.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Gesamtüberblick hinsichtlich „Eignungsgrad“, Vorund Nachteile der verschiedenen Emails erstellt. Viele der sich gut darstellenden sog. Induktionsemails basieren auf die Grundabmischung eines Ofenemails der Fa. Kühn Email, dem KAL 111.

<b>KA111 (Emailschlicker): Zusammensetzung; 20 min Kugelmühle</b>					
GS 1545	25g		Prince	VO 21196	75g
Blauton	3g		Weißton		3g
Borsäure	5g		MgCO <sub>3</sub>		0,2g
NaNO <sub>2</sub>	0,033g	Bentonit		0,2g	
FK 2600	1,33g		Wasser		50-60g

Kritisch muss hierbei angemerkt werden, dass die vorgenommenen Optimierungsversuche und darauf basierenden Messreihen bei weitem nicht das Potential des Materials ausschöpfen und abbilden; hier sind mehr Aktivitäten erforderlich.

Das Problem eines schnellen Aufschmelzens der Emaile auf der heißen Metalloberfläche ist noch nicht final behandelt; hier muss weitergearbeitet und optimiert werden.

Ein zu hoher Zeitbedarf für den Aufschmelzprozess und Abbindungsprozess bedeutet auch eine zu lange notwendige Temperatureinwirkung auf den Oberflächenrandbereich des Trägermaterials und damit eine unfreiwillige Begünstigung der Energie – und Wärmeab-  
leitung in das Materialinnere mit der Gefahr von Gefügebeeinflussungen im Randbereich.

Abbildung 8 zeigt für ausgewählten Schiffstahl den Wärmeeintrag bzw. die Wärmeab-  
leitung in das Trägermaterial bei induktiver Erwärmung.

Der Qualifizierung der Induktionsemaile ist für zukünftige Arbeiten höchste Aufmerk-  
samkeit zu widmen. Inwieweit neue und bisher noch nicht eingesetzte Zusätze sich hier  
positiv darstellen, bleibt weiteren Versuchen vorbehalten. Bewährte NANO Zusätze  
zeigten nur begrenzt Erfolg und sind im Hinblick auf einen großflächigen Einsatz noch  
nicht ausgereift; weitere Untersuchungen sollten zeigen, ob die Behandlung mit NANO –  
Material sich aufgrund zu erwartender „Elastizität“ positiv an kritischen Oberflächen-  
punkten wie Schweißnähten, Ecken und Kanten und ähnliches auswirken kann.

Gute Ergebnisse werden hier nach ersten Versuchen ggf. bei Zugabe von ZnO<sub>2</sub> in Form  
von Tetrapoden erwartet.

## B: Anlagentechnik

Die Technik basiert auf dem sog. Skin-Effekt, bei welchem hochfrequente Magnetfelder  
auf einer leitenden Oberflächen Wechselströme durch Induktion erzeugen. Je höher  
die Frequenz desto geringer die Eindringtiefe des Wechselstroms, sodass nur die Ober-  
fläche erhitzt wird.

Je mehr Leistung eingekoppelt wird, desto höher die Temperatur. Für Emailliervorgang  
sollen Oberflächentemperaturen zwischen 500 °C und 800 °C sehr kurzfristig erreicht  
werden.

Abbildung 1 dient zur Darstellung des Skin-Effektes. Die entstehende Temperatur ist  
gefüge- und materialabhängig.

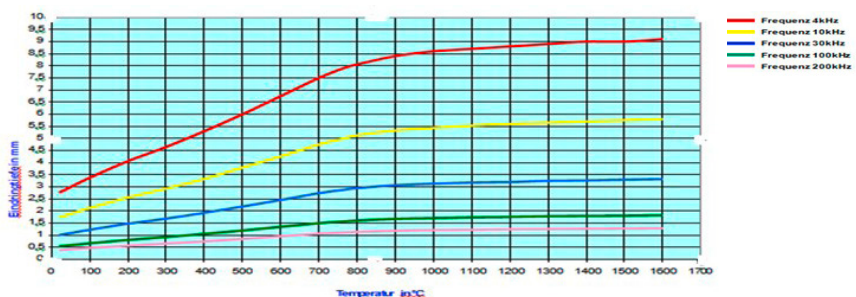


Abb. 1: Eindringtiefe des der Temperatur in Abhängigkeit der Frequenz (Kurve INNO HEAT GmbH)



Abb. 2: HF-Leistungsumrichter 70kW/700 kHz

Voll programmierbarer HF-Umrichter für den MCS Einbrand. Ein Herzstück der Verfahrensentwicklung. Leistung und Frequenz lassen sich bis zu den Maximalwerten frei programmieren (max. 70kW/max. 700 kHz).



Abb. 3: Mobiles Reparaturoquipment komplett

In Abbildung 3 wird eine Anlage abgebildet, die zum Reparieren lokaler Schadstellen angewendet wird. Die Anlage bedarf nur eines elektrischen Anschlusses.

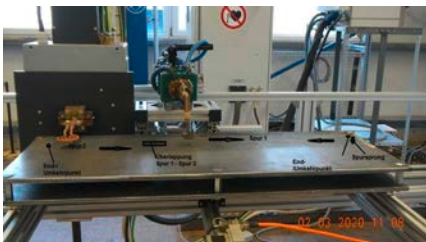


Abb. 4: Horizontal-Scaneinheit 2-dimensional



Horizontal-Scaneinheit 2-dimensional mit HF-Umrichter (Hintergrund) Ausgangstrafo und aufgesetztem HF-Induktor und Kleineinheit zur Vorerwärmung.

Diese Scaneinheit wurde entwickelt und gebaut für den induktiven MCS–Einbrand bei Rohren, Profilen und auf Flächen. Gefertigt von Sensatronic.



Abb. 5: Sortiment eingesetzter HF Induktoren

Fähigkeit: Die Induktoren erzeugen unterschiedliche geformte Magnetfelder, je nachdem welches Objekt bearbeitet werden soll.

Eine weitere „Verfahrensreserve“ wird nach Ausschöpfung der technischen Parameter des Induktionsequipments darin gesehen, unter Nutzung der gesammelten Erfahrungen die Bandbreite der Verfahrensparameter deutlich weiter zu vergrößern (höhere HF-Leistung, höhere Frequenzen, Optimierung/Anpassung der Induktoren). Dies ist im Zusammenwirken mit der weitergehenden Emailloptimierung Grundvoraussetzung für einen erfolgsversprechenden großtechnischen Einsatz.

In Kombination weiter optimierter Induktionsemaille und Induktionsequipment ist es möglich, die bisher guten Ergebnisse dahingehend zu entwickeln, dass alle im Projekt und in der Aufgabenstellung avisierten Ergebnisse weiter verbessert werden und eine großtechnische Lösung damit umsetzbar wird.

In der Schlussphase des Projektes vorgenommenen Versuche des Scannens der vorbereiteten Oberfläche mit vorgelagerter induktiver Vorerwärmung dienen weiter der Minimierung der Einbrennzeiten und lassen auch hinsichtlich einer möglichen Nacherwärmung zur Vermeidung unfreiwilliger Spannungsbildung gute Ergebnisse erwarten. Abbildung 4 zeigt die Scaneinheit mit Vor- und Haupterwärmung.

### C: Ergebnisparameter: aus Zusammenwirken Material - Technik

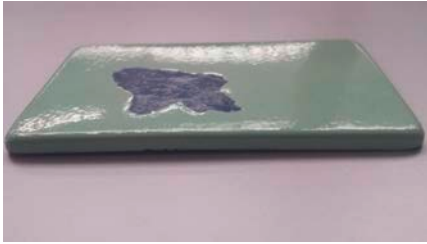


Abb. 6: Beschädigte Emaille -Schadstelle



Abb. 7: Schadstelle nach Reparatur

In den Abbildungen 6 und 7 wird gezeigt, dass sich Reparaturstellen ohne sichtbare Spuren wieder reparieren lassen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich die MCS-Beschichtung immer wieder aufschmelzen lässt. Die Reparatur-Email verbindet sich beim Aufschmelzen nahtlos mit der bereits aufgetragenen Email. Dieses Ziel wurde mit dem induktiven Verfahren, hier als Reparatur, erreicht.

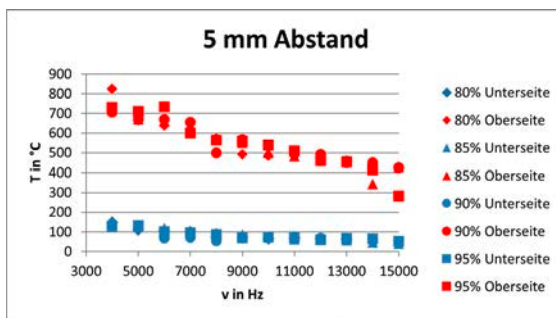


Abb. 8: Wärmeeintrag und Wärmeleitung in Schiffbaustahl

In der Abbildung 8 wird der Zusammenhang zwischen Frequenz und Leistung (in Prozent) bei festem Abstand des Induktors zum Grundmaterial dargestellt.

Für das Verfahren galt es Abstand, Frequenz und Leistung so aufeinander abzustimmen, dass die optimale Temperatur zum Aufschmelzen der Email gefunden wird. 5 mm Abstand wurde gewählt, da das Grundmaterial nicht immer eben ist. Schweißnähte und anderen Unebenheiten müssen überfahren werden.

Ein Vergleich der verschiedenen Wärmeübertragungsarten (Abb. 9) zeigt, dass das induktive Verfahren effizient ist. Insbesondere das Verhältnis zum normalen Ofen fällt positiv aus.

Erwärmungsart	Leistungsübertragung (W / cm <sup>2</sup> )
Konvektion (Wärmemitnahme, durch Molekularbewegung)	$5 \cdot 10^{-1}$
Strahlung (Elektroofen, Muffelofen)	8
Wärmeleitung, Berührung (Kochplatte, Salzbad)	20
Infrarot-Punktstrahler	$2 \cdot 10^2$
Flamme (Brenner)	$10^3$
Induktionserwärmung	$10^4$
Laser (CO <sub>2</sub> )	$10^8$
Elektronenstrahl	$10^{10}$

Abb. 9: Effizienz verschiedener Wärmeübertragungsarten

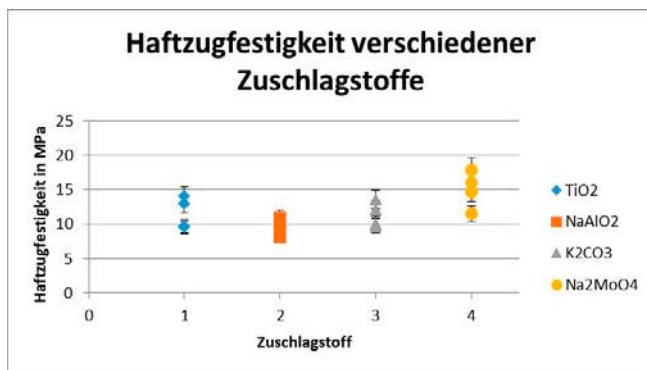


Abb. 10: Wirkung verschiedener Zuschlagstoffe im Email auf die Haftzugfestigkeit

Zugschlagstoffe sind ein weiterer Parameter für kontinuierliche Weiterentwicklung der MCS-Beschichtung. Eine erhöhte Haftzugfestigkeit ist immer im Zusammenhang mit der Schwingfestigkeit der Beschichtung zu sehen. Hier besteht weiterhin Untersuchungsbedarf.

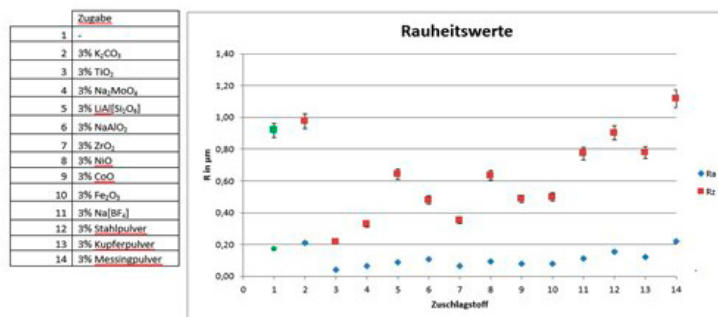


Abb. 11: Rauheitswerte in Abhängigkeit der Zugaben, hier Oxide (Beeinflussung von Schmelzpunkt und Färbung)

Die Rauheit ist kleiner 1,2 µm. Als Vergleich sei an dieser Stelle erwähnt, dass „sehr glatte“ Gasturbinenschaufeln Werte um 3 µm haben sollen. Hier wird das Ziel einer sehr glatten Oberfläche erreicht, womit Ablagerungen oder Anhaftungen sehr stark reduziert werden. Ein „Verkeilen“ an rauen Stellen ist kaum möglich.

Die folgende Abbildungen 19 beschreibt Email-Eigenschaften bei verschiedenen Zuschlagstoffen, als auch den Algorithmus zur Findung.

Zusammenfassung KAL 111  
auf Schiffbaustahl

Zugabe	Schichtdicke in µm	Ra		Haftzugtest in MPa	Federschlagtest mit 70 N	
		Ra	Rz		Größe des Schadens	Art der Abplatzung
-	110-140	0,174	0,917	>24	3,0mm x 5,0mm	schuppenförmig
3% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	50-65	0,211	0,976	>24	0,5mm x 0,5 mm	glatt, ohne Risse
3% TiO <sub>2</sub>	160-180	0,041	0,216	>24	0,8mm x 1,0mm	glatt, ohne Risse
3% Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	70-78	0,066	0,327	>24	1,2mm x 1,5mm	leicht schuppenförmig
3% LiAl(Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	100-150	0,088	0,642	>24	0,8mm x 1,2mm	leicht schuppenförmig
3% NaAlO <sub>2</sub>	80-105	0,108	0,480	>24	1,0mm x 1,5 mm	leichte ovale Abplatzung
3% ZrO <sub>2</sub>	100-130	0,067	0,349	>24	4,0mm x 5,0mm	rund, ohne Risse
3% NiO	200-220	0,095	0,635	>24	8,0mm x 8,0mm	schuppenförmig
3% CoO	75-95	0,077	0,486	>24	4,0mm x 4,0mm	sternenförmig
3% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100-40	0,080	0,498	19,03	4,0mm x 4,0mm	rund, ohne Risse
3% Na(BF <sub>4</sub> )	70-150	0,111	0,772	>24	4,0mm x 4,0mm	rund, ohne Risse
3% Na <sub>2</sub> (SiF <sub>6</sub> )	40-60	1,630	8,012	11,87	2,0mm x 3,0mm	sternförmig, Risse
3% Stahlpulver	110-140	0,155	0,902	>24	4,0mm x 4,0mm	rund, ohne Risse
3% Kupferpulver	100-130	0,121	0,778	>24	4,0mm x 4,0mm	rund, ohne Risse
3% Messingpulver	100-140	0,218	1,118	19,99	4,0mm x 4,0mm	rund, ohne Risse

Abb. 12:Email KAL 111 mit verschiedenen Zusätzen und Auswirkungen auf Oberflächeneigenschaften

Bilder/Serie Maritimkomponenten (teils Ofen/teils Induktion)

> Mechanische (Abrieb) und chemische Tests (Salznebelprühtest) bestanden



Abb. 13: Klüse für Superyacht – rein induktiv



Abb. 14 Poller für Decksaufbau für Superyacht – grün induktiv, schwarz Ofen

Hersteller jeweils Abeking & Rasmussen SE

### 3. ZUSAMMENFASSUNG

Die im Projekt gesteckten Ziele wurden voll umfänglich erreicht. Es bietet sich mit MCS eine Technologie zur Schaffung chemieneutraler, umweltfreundlicher und kostengünstiger Oberflächen an, die nicht nur in ihrer Herstellung, sondern auch im Betrieb und bei der Wartung hohe Einspareffekte sichern, so wie in der Antragstellung und in den Zwischenberichten dargelegt.

Entgegen bekannten und im Projektzeitraum laufenden Vergleichsprojekten und Aktivitäten werden bei Beachtung der gewonnenen Erkenntnisse gute Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der Technologie, der Materialien und Technikkomponenten für die Vorbereitung eines zeitnahen produktionstechnischen Einsatzes für großflächige Strukturen, insbesondere im maritimen Bereich gesehen.

Nach ersten Vorträgen und Veröffentlichungen (Internet) zeigen sich auch international erste positive Reaktionen in Form von Nachfragen zu den Verfahren als solches und dem eingesetzten Equipment.

Für eine Weiterentwicklung der Technologie gilt es neue Voraussetzungen zu schaffen und neue Partnerschaften einzugehen. So wurden erfolgreiche Ansätze geschaffen, um in enger Kooperation mit Fraunhofer (Rostock und Hamburg) hinsichtlich Robotertechnik und NANO Technologie nächste Schritte zu gehen.

## ERGEBNISSE QUALITATIV

- › Kein Fouling (ausstehende Langzeittests)
- › Keine Korrosion (vorausgesetzt Email und Technik sichern geschlossene Oberflächen)
- › Minimierter Reibungswiderstand und besseres Strömungsverhalten
- › Minimierte Schichtdicke des Antifoulings (50 - 100 µm) und dadurch hohe Masseeinsparung
- › Reduzierung von Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub> – Ausstoß
- › Voll recyclebare Oberflächen bei Einsatz kostengünstiger einheimischer Rohstoffe
- › Minimierter Service- und Wartungsaufwand
- › Keine Chemie, keine Verunreinigungen – keine mikrochemischen Umweltverschmutzungen
- › Sehr hohe mechanische (Abrieb), thermische und chemische Beständigkeit
- › Alle durchweg ermittelten Ergebnisse sind mindesten gleichwertig zu denen mit Ofeneinbrand erzielten, oftmals deutlich besser.
- › Ergebnisse quantitativ (belegt durch Messwerte, Kurven, Tabellen und Fotos)
- › Rauigkeitswerte < 1,2 µm (geschlossen porige Oberfläche)
- › Haftfestigkeit der MCS – Schicht bis 20 MPa

Es bleibt die Schlussaussage, dass MCS eine Innovation hinsichtlich neuer Oberflächen bei maritimen Anwendungen ist. Noch ist einiges zu tun dafür. Es wurde ein lösungsmittelfreies, robustes Antifoulingssystem (gegen Bewuchs jeglicher Art) entwickelt, mit der entsprechenden Seewasserbeständigkeit und Korrosionsschutzfunktion.

Dieses System kann nun auf beweglichen maritimen Strukturen (Außenhaut aus Stahl, Bilgen, Tanks, Laderäume, ...) oder stationären maritimen Strukturen SMS (Windkraftanlagen, Bojen, Schleusentoren und deren Zuleitungen, Bohrinseln, etc.) angewendet werden.

## DANKSAGUNG

Wir bedanken uns beim BMWi und dem PtJ für die Möglichkeit der Durchführung für dieses innovative und herausfordernde Projekt. Besonders danken wir dem PtJ für die sehr gute Betreuung. Den Projektpartner danken wir für ihre unermüdliche Zuarbeit, hier insbesondere der Hochschule Wismar und der im Unterauftrag F/E-seitig gebundenen Inno Heat GmbH.

## LITERATUR

- [1] Informationsschriften des dev (deutscher email verband)
- [2] Zeitschrift „Schiff & Hafen“
- [3] Zeitschrift „Ship & Offshore“
- [4] Informationen des Patentamtes
- [5] Informationen des Patent- Anwaltsbüros T & W
- [6] JOT „Journal für Oberflächentechnik“, Magazin
- [7] WOMAG „Kompetenz in Werkstoff und funktionaler Oberfläche“, Magazin
- [8] Fachbuch des Deutschen Email Verbandes e.V. „Email-Emailieren-Emailierung/  
Einführung in die Emailtechnologie“
- [9] Handbuch „Korrosionsschutz in der Seeschifffahrt“ von Sebastian Dießner
- [10] Fachbuch „Wirtschaftlichkeit und Wirkungsweise silikonbasierter Antifouling  
bei Seeschiffen“ von Dipl.-Ing. Cezary Afeltowicz
- [11] „Zukunft Meer“ - Maritimes Jahrbuch 2017 / 2018
- [12] Fachbuch „Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik“ von  
Hans-Georg Hofmann und Jürgen Spindler
- [13] „Email und Emailiertechnik“ von Amin Petzold, Springer Verlag
- [14] „Emailierung“ von A.H. Dietzel, Springer Verlag
- [15] „Korrosion und Korrosionsschutz“ von G. Wranglén, Springer Verlag
- [16] „Heat Treatment Master Control Manual“ von William E. Bryson,  
HANSER Verlag





# REMOTEDTECT –

EINE DRAHTLOS BETREIBBARE MANSCHETTENTECHNOLOGIE FÜR DIE ZUSTANDS-  
ÜBERWACHUNG VON GRÜNDUNGS-STRUKTUREN MITTELS GEFÜHRTER ELASTISCHER  
WELLEN

## AUTOREN

<b>DIPL.-ING. FRIEDRICH VON DUNGERN</b>	INVENT GMBH, BRAUNSCHWEIG
<b>DR. RER. NAT. BIANCA WEIHNACHT</b>	FRAUHOFFER IKTS, DRESDEN
<b>DIPL.-ING. (SFI) TOBIAS GAUL</b>	FRAUHOFFER IKTS, DRESDEN
<b>DR.-ING. TIMO SCHOLEHWAR</b>	PI CERAMIC GMBH, LEDERHOSE

## 1. EINLEITUNG ODER MOTIVATION

Die Zahl an Offshore-Windenergieanlagen nimmt kontinuierlich zu und leistet somit einen wichtigen Beitrag beim Ausbau erneuerbarer Energien und ist damit relevantes Element zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele. Geschweißte Gründungsstrukturen sind dabei Stand der Technik und durch widrige und wechselhafte Umweltbedingungen hochbelastet, wodurch Schweißnahtrisse entstehen können. Konventionelle Prüfverfahren sind Offshore nur begrenzt einsetzbar, weshalb die Entwicklung geeigneter halb- und vollautonomer Zustandsüberwachungssysteme zunehmend wichtiger wird. Aus dieser Motivation heraus wurde eine Sensormanschette entwickelt, die an Unterwasserstrukturen installiert werden kann und drahtlos angebunden Auskunft über den Zustand dieser Strukturen gibt. Darüber und mittels ferngesteuertem Unterwasserfahrzeug (ROV) hinaus ist solch eine Technologie für weitere Offshore-Bauwerke wie Brücken, Konverterplattformen und Pipelines geeignet.

## 2. EIGENES THEMENFELD

Der Ausbau erneuerbarer Energien geht mit einem hohen Bedarf an Offshore-Windenergieanlagen einher. Diese Entwicklung findet nicht nur national, sondern weltweit statt. Raue Witterungsbedingungen lassen dabei Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten auf hoher See deutlich komplizierter werden, als dies in Windparks an Land der Fall ist. Daraus resultieren empfindlich höhere Wartungskosten. Wurden in der Vergangenheit vorrangig Taucher eingesetzt, deren effektive Arbeit durch Tide, Strömung und Witterung stark begrenzt ist, wird zunehmend auf den Einsatz von Tauchrobotik (Remote Operated Vehicle – ROV und Autonomous Underwater Vehicle - AUV) gesetzt, welche signifikante Vorteile bei der Inspektion von Unterwasserstrukturen bietet. Die schwierigen Bedingungen Offshore lassen weiterhin die Nutzung konventioneller Prüfverfahren nur in Maßen zu.

Im Fokus für das neuartige Prüfverfahren stehen Offshore-Bauwerke aus geschweißten, stählernen Rohrstrukturen. Insbesondere Gründungsstrukturen ertragen hier ein komplexes

Lastkollektiv aus Eigengewicht, Wellen- und Strömungskräften sowie den Betriebslasten der jeweiligen Anlage. In Kombination mit den korrosiven Umgebungsmedien können z. B. Risse in Schweißnähten entstehen, deren Detektion das vorrangige Ziel im dargestellten Projekt ist.

Der hier verfolgte Ansatz für die Überwachung von Schweißnähten beruht auf der Manschettenkonstruktion CoMoBelt®, die in ersten Generationen mittels am Markt verfügbarer piezoelektrischer Wandler bereits Inhalt verschiedener Untersuchungen durch das Fraunhofer IKTS und verschiedener Projektpartner war. Der CoMoBelt® besteht dabei aus um eine Rohrstruktur ringförmig angeordneten, piezoelektrischen Wandlern, die jeweils an sensornahe Elektronik angeschlossen sind und den Wandler über einen Bus mit dem Kommunikationsmodul und einem Energieversorgungsmodul verbindet. Die Komponenten sind durch verschiedene Barrierschichten gekapselt, wodurch sie den vorhandenen Umgebungsmedien geschützt sind.

Die piezoelektrischen Flächenwandler bestehen aus Piezokeramiken, die durch eine Kapselung robust und biegsam werden und komfortabel anzuschließen sind. Wird eine elektrische Wechselspannung angelegt, lassen sich mechanische Wellen in Strukturen induzieren. Werden die Wandler als Sensoren eingesetzt, sind sie in der Lage diese Wellen in elektrische Signale zu wandeln und somit zu detektieren. Diese beiden Betriebsmodi macht man sich in Anwendungen der Zustandsüberwachung zu Nutze. Ein definiertes Signal wird über einen Wandler induziert, während die anderen Wandler „lauschen“. Nach und nach werden alle Wandler durchgeschaltet und die gesammelten Daten über Tomographie-Algorithmen ausgewertet. Dabei werden auch aufgezeichnete Umweltdaten berücksichtigt, um die Messsignale zu korrigieren. Nötig wird dies durch u. a. das temperaturabhängige Verhalten der sich ausbreitenden Wellen. Im Fall der Sensormanschette werden beim eingesetzten Verfahren die Reflexionen an der Schweißnaht interpretiert und eine Aussage über den Zustand getroffen. Während in der ersten Generation noch Wandler eingesetzt wurden, welche sich bei einem senkrecht zur Keramikplatte angelegten elektrischen Feld in der Fläche ausdehnen und kontrahieren, war ein zentrales Element der Untersuchungen des vom BMWi geförderten Vorhabens RemoteDetect die Entwicklung von piezoelektrischen Scherwellenwandlern. Der maßgebliche Unterschied besteht in den emittierten Wellenformen, die in der Ausgangsform empfindlich auf Bewuchs reagieren und somit in ihrer Aussagekraft gestört werden. Scherwellen werden, aufgrund ihrer tangentialen Bewegung, kaum durch diesen Bewuchs beeinflusst und eignen sich somit sehr gut für die Anwendung zur Überwachung von maritimen Unterwasserstrukturen. Bei Scherwellenwandlern verschieben sich beim Anlegen eines elektrischen Feldes Ober- und Unterseite der Keramik zueinander, wodurch an einer Kante Scherwellen und an der jeweils 90° dazu ausgerichteten Kante Longitudinalwellen emittiert werden. Allerdings waren Scherwellenwandler in flexibler, laminierbarer Technologie bisher nur auf einem niedrigen technischen Reifegrad kommerziell erhältlich, was sich durch dieses Projekt geändert werden könnte.

Das Konsortium war so aufgestellt, dass zunächst durch die PI Ceramic GmbH geeignete Keramikmischungen entwickelt wurden, welche durch die INVENT GmbH zu anschließend zu gekapselten Wandlern weiterverarbeitet wurden. Die Integration zum Gesamtsystem erfolgte am Fraunhofer IKTS. Somit konnte die gesamte Wertschöpfungskette vom Funktionswerkstoff in Form der Keramikmischung über die Verfahrensalgorithmen bis hin zur Validierung in der Anwendung abgebildet und zukunftsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Bei der Entwicklung von Keramikmischungen lag der Fokus zunächst auf Erhöhung des Wirkungsgrads durch die Maximierung möglicher Dehnungen mittels Erprobung verschiedener Zusammensetzungen, die zu Scherkeramiken polarisiert wurden. Die verschiedenen Varianten konnten innerhalb der Projektdurchführung charakterisiert und die Dehnung der Scherkeramiken durch neuartige Keramikmischungen deutlich erhöht werden.

Für den effektiven Einsatz von Scherwellenkeramiken wurden diese in einem iterativen Vorgehen anschließend in verschiedenen Formfaktoren mittels Laservibrometrie charakterisiert. Im Augenmerk standen dabei die frequenzabhängigen Maximalamplituden zweier Wellenmoden, der SH<sub>0</sub>-Mode (Scherwelle) und der S<sub>0</sub>-Mode (Longitudinalwelle). Ziel der Entwicklung war dabei, dass ein möglichst großer Anteil der zur Verfügung stehenden Energie in Scherwellen umgewandelt wird und der Longitudinalanteil möglichst klein bleibt. Bei einem Seitenverhältnis der Keramik von 1:1 wird bei der identifizierten Prüffrequenz ein Amplitudenverhältnis zwischen SH<sub>0</sub>/S<sub>0</sub> von 2 erreicht. Bei einem Seitenverhältnis von 4:1 liegt das Amplitudenverhältnis bereits bei 4. Unter den fertigungsbedingten Randbedingungen für Piezokeramiken und Wandler wurde solchermaßen das optimale Seitenverhältnis ermittelt. In einem weiteren Entwicklungsschritt konnte der unerwünschte Longitudinalanteil durch eine spezielle, zunächst per Finite-Elemente-Methode simulativ ermittelte und später experimentell validierte Bauweise nahezu eliminiert werden. Durch das nun mögliche gezielte Auslösen und Verstärken verschiedener Schwingungsformen wurde die Auslegung für das Gesamtsystem mit Fokus auf eine hohe Signalgüte und Aussagekraft ermöglicht.

In einem weiteren Arbeitspaket wurden die Schnittstellen zur Umgebung betrachtet. Da die Manschette drahtlos betrieben wird und elektromagnetische Felder die Funktion der Wandler empfindlich stören können, lag ein Augenmerk auf der Validierung verschiedener Schirmungskonzepte. Durchgesetzt und als besonders wirksam und zuverlässig bewertet wurde die Variante mit flächigen Kupferlagen, die die gesamten Wandler umschließen. Für den Anschluss an die einzusetzende Elektronik wurde ein flexibler Flachleiter integriert, der über ein Standardrastermaß den Anschluss an genormte Verbinder erlaubt.

Bei der Umsetzung der eigentlichen Manschette stand die Langlebigkeit und Zuverlässigkeit der einzusetzenden Elektronik im Fokus. Neben den Modulen, die aus den einzelnen Wandlern einen Bus bilden, ist in der Manschette eine zentrale Datenvorkonditionierung integriert sowie drahtlose Schnittstellen zur separaten Daten- und Energieübertragung. Die gesamte Einheit ist dauerhaft durch einen Mehrschichtverbund ummantelt, der flexibel ist

und das System vor den Umgebungsmedien, in diesem Fall Meerwasser, schützt. Auf der Gegenseite wurde der ROV mit einer drahtlosen, induktiven Energieübertragung und der Datenkommunikation ausgestattet. Somit kann die Manschette berührungslos betrieben und die Messdaten ausgelesen werden.

Abgeschlossen wurde das Projekt durch erfolgreiche Tests in einem Hafenbecken in Rostock, bei denen die ROV-Tauglichkeit erprobt wurde. Nach einer Baselinemessung ohne Fehler wurde ein Riss mit  $70 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$  als Schweißnahtflankenfehler mit einer Flex eingebracht. Das Gesamtsystem und das zugehörige Messverfahren wurden erfolgreich validiert.

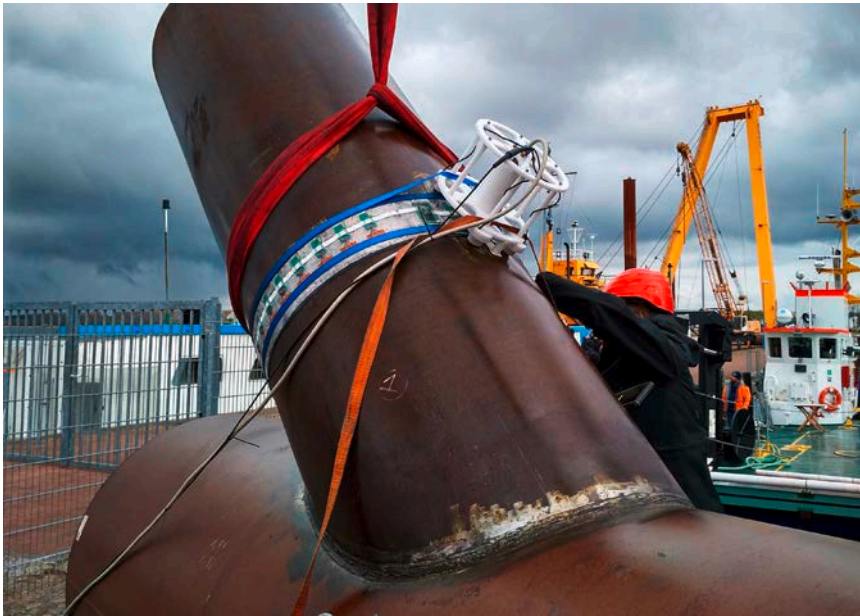


Abb. 1: Sensormanschette am Rohrknoten beim Hafenbeckentest



Abb. 2: Scherwellenwandler mit Schirmung und male pinout

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Verbundvorhaben RemoteDetect wurde entlang der Wertschöpfungskette von der Keramikmischung über die Wandlerbauform bis hin zur integrierten Manschettenlösung eine, auf piezoelektrischen Scherwellenwandlern basierende, Manschettentechnologie entwickelt, mit der sich strukturelle Schäden an Offshore-Strukturen unabhängig von Bewuchs detektieren lassen. Die Messung erfolgte über ein ROV, das die Manschette über eine drahtlose Schnittstelle mit Energie versorgt und über ein Unterwasser-Wifi-Modul mit der Manschette kommuniziert. Die Funktion wurde in einem Hafenbeckentest an einem Rohrknoten mit künstlich eingebrachten Beschädigungen erfolgreich demonstriert.

## DANKSAGUNG

Das Konsortium dankt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, vertreten durch Frau Kohlheim und Herrn Lehmann und Herrn Boeck vom Projektträger Jülich, für die Förderung und die exzellente Beratung in allen Fragestellungen. Weiterhin danken wir unseren assoziierten Partnern Baltic Taucher und TenneT Offshore für die hervorragende Zusammenarbeit und die hilfreichen Einsichten in die branchenspezifischen Anforderungen. Ein großer Dank gilt ebenfalls dem projektbegleitenden Ausschuss für die Einschätzung der Anwendungsfälle, eingeschlagene Entwicklungswege sowie konstruktive Hinweise an wichtigen Meilensteinen.

## LITERATUR

- [1] T. Gaul, Y. Kim, B. Weihnacht, L. Schubert (2019): Entwicklung von piezoelektrischen Scherwellenwandlern für die Zustandsüberwachung von Offshore-Gründungsstrukturen, DGZfP-Jahrestagung 2019, Friedrichshafen
- [2] B. Weihnacht, T. Gaul, T. Klesse, M. Oemus, J. Wollstadt, R. Neubeck, S. Sonntag, L. Schubert: Geführte elastische Wellen für die Untersuchung von Unterwasserschweißnähten mittels kabelloser Manschettentechnologie und Unterwasserrobotik, DGzfp-Tagung Schall21, 24. - 25. Februar 2021 als virtuelle Veranstaltung



# HiOcav –

VERBESSERTER PROGNOSE DER DURCH DIE WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN SCHICHT- UND SPITZENWIRBELKAVITATION BEDINGTEN DRUCKSCHWANKUNGEN HÖHERER ORDNUNG

## AUTOREN

<b>DR.-ING. MARTIN GREVE</b>	THYSSENKRUPP MARINE SYSTEMS, KIEL
<b>DIPL.-ING. HANS-JÜRGEN HEINKE</b>	SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT, POTSDAM
<b>M.SC. RHENA KLOSE</b>	SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT, POTSDAM
<b>M.SC. ROLAND GOSDA</b>	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, INSTITUT FÜR FLUIDDYNAMIK UND SCHIFFSTHEORIE
<b>DIPL.-ING. KEQI WANG</b>	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, INSTITUT FÜR FLUIDDYNAMIK UND SCHIFFSTHEORIE
<b>PROF. DR.-ING. MOUSTAFA ABDEL-MAKSoud</b>	TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, INSTITUT FÜR FLUIDDYNAMIK UND SCHIFFSTHEORIE
<b>PROF. DR.-ING. NILS DAMASCHKE</b>	UNIVERSITÄT ROSTOCK, INSTITUT FÜR ALLGEMEINE ELEKTROTECHNIK, OPTOELEKTRONIK UND PHOTONISCHE SYSTEME
<b>DR.-ING. ERIC EBERT</b>	UNIVERSITÄT ROSTOCK, INSTITUT FÜR ALLGEMEINE ELEKTROTECHNIK, OPTOELEKTRONIK UND PHOTONISCHE SYSTEME
<b>PROF. DR.-ING. SASCHA SPORS</b>	UNIVERSITÄT ROSTOCK, INSTITUT FÜR NACHRICHTENTECHNIK
<b>DR.-ING. FRANK PAPPENFUSS</b>	FORTECH SOFTWARE GMBH, ROSTOCK
<b>DIPL.-ING. WITHOLD DRAZYK</b>	PIENING PROPELLER, GLÜCKSTADT
<b>DIPL.-ING. LUTZ KLEINSORGE</b>	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH, WAREN (MÜRITZ)
<b>M.ENG. BENJAMIN KLEMSTEIN</b>	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH, WAREN (MÜRITZ)

## 1. MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

An Schiffspropellern auftretende Kavitation stellt häufig ein Problem dar, da Kavitation zu starken Vibrationen der Schiffsstruktur führt, die abgestrahlten Schallpegel deutlich erhöht und zur Erosion am Propeller führen kann. Maßnahmen zur Reduzierung von Kavitation führen im Allgemeinen zu einer Wirkungsgradreduzierung, sodass der Propellerentwurf im Spannungsfeld zwischen Minimierung der Kavitation und Maximierung des Wirkungsgrades liegt. Zusätzlich führt eine Reduktion des Kavitationsvolumens oft zu einer höheren Instabilität der Kavitation, was eine Erhöhung der kavitationsbedingten Schwingungserregung höherer Frequenzen (Ordnungen) begünstigen kann. Ein guter Propellerentwurf

in diesem Spannungsfeld erfordert daher eine detaillierte Kenntnis der Kavitationserscheinungen an Propellern, sowie der Übertragbarkeit vom Modell auf die Großausführung.

Die im Vorhaben HiO cav durchgeführte Forschung und Entwicklung dient dazu, eine sichere Übertragung von Modellversuchsergebnissen auf die Großausführung hinsichtlich Druckschwankungen höherer Ordnung (d. h. mindestens zweifacher Blattfrequenz) zu ermöglichen. Weiterhin werden die Wechselwirkung zwischen Schicht- und Spitzenwirbelkavitation, die zeitliche Änderung des Kavitationsvolumens und der Einfluss unterschiedlicher Kavitationsarten auf die Druckschwankungen untersucht. Dazu werden neuartige Messverfahren und numerische Methoden entwickelt und zur Anwendung gebracht.

## 2. PROJEKTPARTNER

Die Partner des Projektverbunds bilden die Fachgebiete der Tätigkeiten im Projekt ab und setzen sich aus Vertretern von Industrie und Forschung zusammen. Dadurch wird sichergestellt, dass alle adressierten Fragestellungen durch die versammelte Expertise abgedeckt werden. Folgende Projektpartner arbeiteten im Verbundprojekt HiO cav:

- › thyssenkrupp Marine Systems (tk MS)
- › Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam (SVA)
- › Technische Universität Hamburg, Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie (FDS)
- › Universität Rostock, Institut für Nachrichtentechnik (INT)
- › Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik, Optoelektronik und photonische Systeme (IAE)
- › FORTech Software GmbH (FOR)
- › Piening Propeller (PIE)
- › Mecklenburger Metallguss (MMG)

## 3. DURCHFÜHRUNG DES PROJEKTS

Die Projektbearbeitung wurde in vier Phasen mit drei Strängen durchgeführt (siehe Abbildung 1). Die Phasen entsprechen dabei unterschiedlichen Versuchsobjekten und gehen von stark vereinfachten Geometrien für die Voruntersuchung in Phase 0 über die Phasen I und II, die einen stationären Tragflügel und einen rotierenden Propeller beinhalten, bis zur Phase III, in der die komplette Konfiguration eines Schiffes betrachtet wurde. Die unterschiedlichen Phasen ermöglichen eine sukzessive Entwicklung der Methoden von simplen Geometrien und Strömungsbedingungen hin zum komplexen, realistischen Versuchsobjekt. Die Untersuchungen wurden sowohl numerisch als auch versuchstechnisch,



teilweise im Modellmaßstab und teilweise im Großausführungsmaßstab, durchgeführt. Die Stränge unterscheiden sich zwischen den experimentellen (Strang A) und den numerischen Untersuchungen (Strang B), sowie der Entwicklung neuer numerischer und experimenteller Verfahren (Strang C).

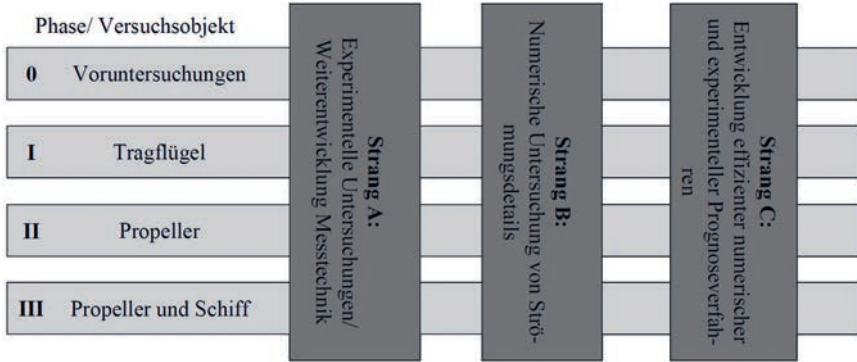


Abb. 1: Phasen des Verbundprojekts HiOcav

## 4. NUMERISCHE SIMULATIONEN

### 4.1. AUSLEGUNG EINES TRAGFLÜGELS

Zur Untersuchung der Interaktion der Schicht- mit der Spitzenwirbelkavitation wurde an der TUHH der Tragflügel HiOfoil für den Kavitationskanal K21 der Universität Rostock entworfen. Für die Umsetzung der Zielvorgaben wurde unter Berücksichtigung umfangreicher Simulationen der HiOfoil über vier Profile aufgebaut, siehe Abbildung 2. Die Profile weisen zur Blattspitze hin eine größere Steigung auf und ermöglichen damit das Eintreten der Schichtkavitation und deren Interaktion mit der Spitzenwirbelkavitation unter den Betriebsbedingungen des K21. Der Tragflügel wurde von der SVA gefertigt und in der Universität Rostock experimentell untersucht. Außerdem wurden an der TUHH numerische Detailuntersuchungen durchgeführt.



Abb. 2: Darstellung des Aufbaus des HiOfoils mit Profilschnitten

### 4.2. NUMERISCHE DETAILUNTERSUCHUNGEN DES TRAGFLÜGELS

Im umfangreichen, detaillierten Simulationen des HiOfoils wurde die Anwendbarkeit verschiedener Turbulenz- und Kavitationsmodelle für die kavitierende Strömung an der Blatt-

spitze und im Spitzenwirbel validiert. Als effizienter Kompromiss zwischen der vollständigen Modellierung und der Auflösung turbulenter Strukturen im gesamten Rechengebiet haben sich hybride RANS-LES Methoden bewährt. Bei einer solchen DES-Simulation werden turbulente Schwankungen abgelöster Strukturen (auch Wirbel oder eddy genannt) aufgelöst, während die anliegenden Grenzschichten mithilfe von RANS-Methoden genau berechnet werden. Ausgehend von den Erkenntnissen über die numerischen Methoden wurde der Einfluss der Kavitation auf die Kräfte am Flügel, den Aufrollvorgang, die Strömung im Spitzenwirbel und die Druckschwankungen untersucht. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Auswertung der Kavitation und Wirbelströmung an der Blattspitze und im Spitzenwirbel sowie die Druckverteilung an der Blattspitze.

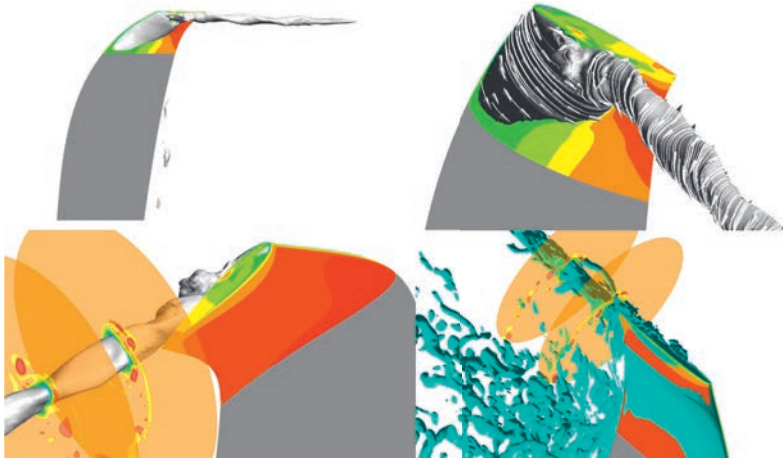


Abb. 3: CFD-Simulation der Wirbelstrukturen in der kavitierenden Strömung für ein Tragflächenprofil.  
 oben links: Iso-Oberfläche mit einem Wasserdampfvolumenanteil von 50 %. Blattspitzen nach dem Druck eingefärbt.  
 oben rechts: Stromlinien auf der Isofläche.  
 unten links: Ebene senkrecht zur Isofläche, eingefärbt in der Wirbelstärke.  
 unten rechts: Q-Kriterium zur Darstellung der Wirbelstrukturen

### 4.3 Berechnung des Smart Dummymodells

Durch die SVA wurden in Phase II systematische Berechnungen mit NACA-Profilen unterschiedlicher Dickenverhältnisse und Längen zur Auswahl eines geeigneten Profils für die Generierung der axialen Nachstromdelle durchgeführt. Abbildung 4 zeigt ausgewählte Ergebnisse der CFD-Berechnungen, die zur Auswahl eines NACA0010-Profil mit der Länge von 1 m führten.

In Phase III wurden die Berechnungen zur Nachstromverteilung eines Smart Dummymodells durchgeführt, um dieses fertigen zu können. Weiterhin sollte die Prognose der Druckschwankungen höherer Ordnung durch eine genauere Erfassung der Wechselwirkungen zwischen Schicht- und Spitzenwirbelkavitation verbessert werden. In diesem Zusammenhang wurden neue Programmroutinen getestet und Sensitivitätsstudien bzgl. Geometrievariationen durchgeführt.

Die Untersuchungen zur Simulation einer vorgegeben Nachstromverteilung mit einem Smart Dummymodell in Phase III zeigten, dass nur die axialen Geschwindigkeitskomponenten mit ausreichender Genauigkeit simuliert werden können. Die tangentialen und radialen Strömungskomponenten werden durch die Veränderung der Hinterschiffsform so stark beeinflusst, dass sich das Kavitationsverhalten des Propellers und die induzierten Druckschwankungsamplituden verändern. Bezüglich der Sensitivität auf Geometrieviationen des Propellers ergab sich, dass unterschiedliche Berechnungsgitter zu teilweise deutlich unterschiedlichen Ergebnissen führen. Sowohl die Zellenanzahl, als auch die Zellenverteilung haben einen erheblichen Einfluss. Die Schwankung kann zwar durch eine geeignete Auswahl der Modellierungsrandbedingungen reduziert werden, es besteht dennoch eine erhebliche Unsicherheit des Ergebnisses. Die genaueren Betrachtungen der Spitzenwirbelkavitation und deren Druckschwankungen gestaltete sich schwierig, da das gewünschte Programm noch nicht in der finalen Version vorlag. Eine Bewertung war daher noch nicht möglich.

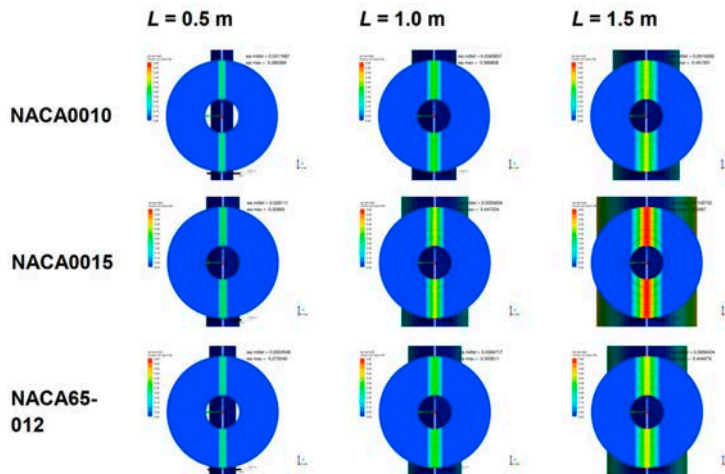


Abb. 4: Vergleich der Nachstromfelder von Profilen in der kleinen Messstrecke des Kavitationstunnels bei  $V_A = 5 \text{ m/s}$  [1]

#### 4.4 Numerische Untersuchung von Maßstabseffekten

Beim Partner tk MS wurde der Einfluss von Maßstabseffekten auf das Kavitationsverhalten mit RANSE-Methoden untersucht. Im ersten Schritt wurden Simulationen mit unterschiedlichen RANS-Turbulenzmodellen durchgeführt und die Ergebnisse gegenübergestellt. Es wurden sehr feine numerische Gitter verwendet und im Bereich des Spitzenwirbels zusätzlich zur Laufzeit eine adaptive Gitterverfeinerung nach dem Q-Kriterium angewendet. Dabei entspricht der Wirbelkerndurchmesser, in dem große Geschwindigkeitsgradienten auftreten, etwa 2-2,5% des Propellerradius im Modellmaßstab. Die verwendeten Turbulenzmodelle sind das Reynolds-Spannungs-Turbulenzmodell *Elliptic Blending RST* und die beiden Wirbelviskositätsmodelle Lag *Elliptic Blending k-ε* und *SST k-ω*. Unterschiede zwischen den Turbulenzmodellen zeigen sich hauptsächlich im Bereich

des nachlaufenden Spitzenwirbels. Mit dem anisotropen Reynolds-Spannung-Turbulenzmodell werden die größten Kavitationszahlen erreicht, was früher einsetzende Kavitation bedeutet. Die geringsten Werte ergeben sich bei Verwendung des SST k- $\omega$ -Turbulenzmodells. Ergebnisse für den Fortschrittsgrad  $J=0,4$  sind in Abbildung 5 dargestellt. Abgebildet sind die Kavitationszahlen, welche sich im Verlauf des Wirbelkerns entlang des Spitzenwirbels oberhalb der Flügelspitze und im Nachlauf der Spitze ergeben (linkes Bild). Im rechten Teilbild ist zusätzlich der Maßstabeffekt dargestellt, berechnet mit dem Lag Elliptic Blending k- $\epsilon$ -Turbulenzmodell. Die Kavitationszahlen im vorderen Bereich der Flügelspitze (A) scheinen überzeichnet zu sein. Die im Modellmaßstab berechneten Kavitationszahlen im Bereich B und die Orte des Auftretens entsprechen insgesamt auch für andere Fortschrittsgrade den Ergebnissen aus dem Modellversuch. Im Großausführungsmaßstab ergibt sich eine deutlich früher einsetzende Spitzenwirbelkavitation.

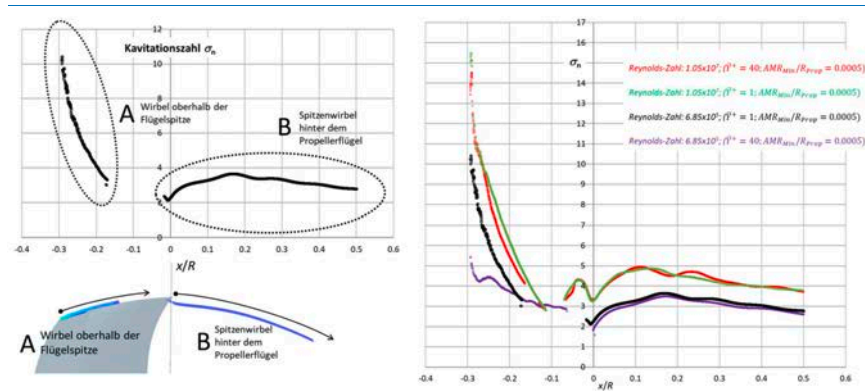


Abb. 5: Bestimmung der Kavitationszahl entlang des Spitzenwirbels (Fortschrittsziffer  $J=0,4$ )

Die Ergebnisse der Simulationen im Großausführungsmaßstab ergeben einen um ca. 1/3 geringeren Wirbelkerndurchmesser und höhere Tangentialgeschwindigkeiten, die zu den genannten höheren Kavitationszahlen führen. Die Abhängigkeit der Kavitationszahl von der Reynolds-Zahl kann mit Hilfe des McCormick Exponenten nach folgender Gleichung beschrieben werden.

$$m(x/R) = \frac{\log\left(\frac{\sigma_{n,FS}(x/R)}{\sigma_{n,MS}(x/R)}\right)}{\log\left(\frac{Re_{FS}}{Re_{MS}}\right)}$$

Die Vergleichswerte der Kavitationszahlen für den Großausführungsmaßstab werden aus den Modellversuchsergebnissen für den Einsatz von Spitzenwirbelkavitation entsprechendem McCormick ( $m=0,3$ ) skaliert. Der Vergleich zu den Simulationsergebnissen ist in Abbildung 6 in Abhängigkeit der Fortschrittsziffer dargestellt. Es ist erkennbar, dass in der Simulation nicht die Unterdrücke erreicht wurden, die auf Basis der Modellversuche prognostiziert und mit Seeversuchen bestätigt wurden.

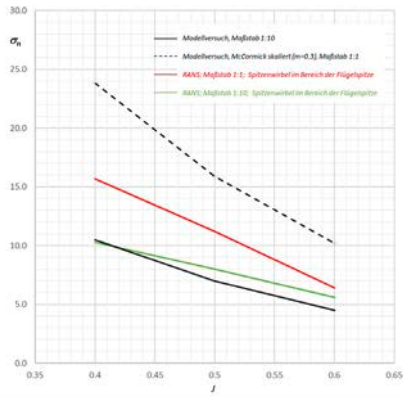


Abb. 6: Kavitationszahl  $\sigma_n$  in Abhängigkeit der Fortschrittsziffer und des Maßstabes

#### 4.5 Numerische Simulation induzierter Druckschwankungen

Die numerischen Simulationen induzierter Druckschwankungen des Projektpartners MMG basieren größtenteils auf dem Potentiallöser panMARE. Auch die RANS-Löser openFOAM und ANSYS CFX sind zur Simulation von Schichtkavitation und dem Spitzenwirbelansatz verwendet worden. Der Fokus lag, neben der Übereinstimmung mit Modellversuchen, auf der Implementierung der Methode in den Entwurfsprozess. Hierdurch war zusätzlich zu der Übereinstimmung der numerischen Ergebnisse mit den Modellversuchen auch die Rechenzeit ein entscheidendes Kriterium. Hauptziel war die Verbesserung der Voraussage propellerinduzierter Druckimpulse gegenüber den bisher verwendeten Methoden.

Der Potentiallöser panMARE, sowie alle verwendeten Spitzenwirbelmodelle sind von der TUHH entwickelt worden. Es werden die drei Spitzenwirbelmodelle

- › VoCav2D,
- › panACav und
- › panM-RANShybrid

bei der MMG anhand eines typischen Entwurfsfalls getestet. Auf Basis eines Ausgangspropellers ist ein zweiter Propeller entworfen worden, der ähnliche Leistungsparameter besitzt wie die Ausgangsvariante, jedoch eine geringere Belastung der Blattspitze aufweist. Für beide Propellerentwürfe sind Modelle gefertigt und von der SVA Potsdam getestet worden. Die numerischen Simulationen beider Propeller werden untereinander sowie mit den Modellversuchen der SVA Potsdam verglichen.

Unter homogener Anströmung sind zunächst das Freifahrtverhalten und das Einsatzverhalten von Schichtkavitation untersucht worden. Weiterhin sind Simulationen unter inhomogener Anströmung mit Schichtkavitationsmodell und den einzelnen Spitzenwirbel-

modellen durchgeführt und die berechneten propellinduzierten Druckimpulse bewertet worden. Abbildung 7 zeigt die Druckverteilung auf dem Ausgangspropeller und die abgehenden Spitzenwirbel unter Propulsionsbedingungen im Auslegungspunkt. Zur besseren Verfolgung eines einzelnen Wirbels ist dieser in blau dargestellt.



Abb. 7: Mit panMARE in Kopplung mit dem Spitzenwirbelmodell panACav numerisch berechneter Spitzenwirbel

Die Ergebnisse der mit panMARE berechneten Freifahrten sind für beide Propeller im relevanten Bereich der Fortschrittsgrade hinreichend genau. Die Simulationen unter homogener Anströmung mit Schichtkavitationsmodell zeigen, wie sich die von Kavitation betroffenen Flächen unter Veränderung der Anströmung verhalten und dass die im Modellversuch auftretende Kavitation durch die numerische Methode hinreichend genau vorhergesagt wird.

Bei der numerischen Simulation unter Propulsionsbedingungen werden die Kräfte an den Propellern durch panMARE hinreichend genau bestimmt. Die Voraussagequalität der propellerinduzierten Druckimpulse durch panMARE in Kombination mit den Spitzenwirbelmodellen ist stark Betriebspunktabhängig.

Abbildung 8 zeigt einen Auszug der Ergebnisse. Es ist zu sehen, dass die Druckimpulse der ersten und zweiten Ordnung unter Auslegungsbedingungen durch das Spitzenwirbelmodell panA-Cav gut getroffen werden. Das Modell VoCav2D prognostiziert die erste Ordnung ebenfalls hinreichend gut. Die zweite Ordnung wird unrealistisch groß prognostiziert. Die dritte und vierte Ordnung werden im Vergleich zum Modellversuch jeweils von VoCav2D überschätzt und von panACav unterschätzt. Insgesamt sind die Ergebnisse zufriedenstellend und führen zu einer gesteigerten Genauigkeit der Vorhersagen.

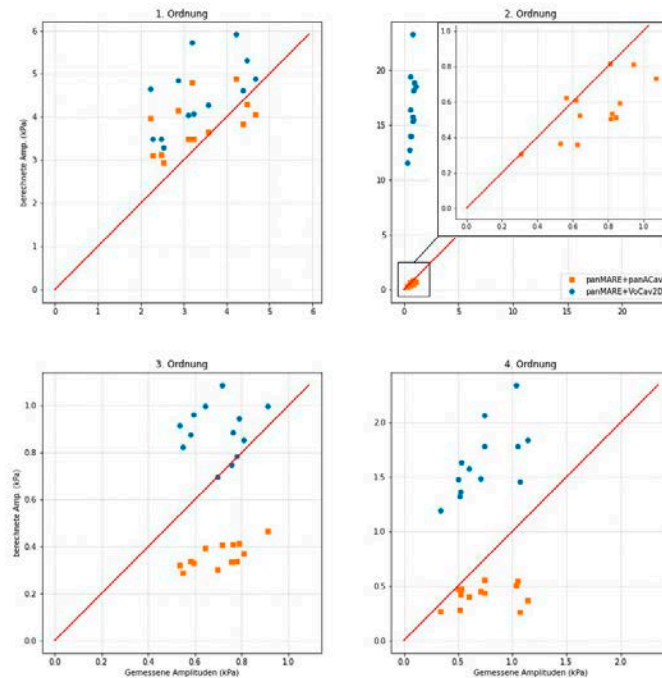


Abb. 8: Vergleich von berechneten und gemessenen Amplituden im Auslegungspunkt des Ausgangspropellers

## 5. ENTWICKLUNG NUMERISCHER VERFAHREN

An der TUHH wurden drei numerische Verfahren zur Simulation des kavitierenden Spitzenwirbels und der Vorhersage der propellerinduzierten Druckschwankungen entwickelt. Das Verfahren panACav berechnet die Kavitation im Spitzenwirbel, und die Verfahren panM-RANShybrid und panMemp binden panACav an ein RANS- bzw. Paneelverfahren zur ganzheitlichen Betrachtung eines kavitierenden Propellers an.

### Verfahren für Spitzenwirbelkavitation

Das Paneelverfahren panACav baut auf dem Randelementverfahren aus [2] auf. Dabei wird die Strömung durch eine Helmholtz-Zerlegung in eine Hintergrundströmung und einen durch die Kavitation induzierten rotationsfreien Strömungsanteil zerlegt. Durch den Einsatz von Relaxationszonen an den Systemgrenzen können endliche Abschnitte einer Kavität im Spitzenwirbel sowie die Interaktion mit der Schichtkavitation modelliert werden. Außerdem wurden neben einem Algorithmus zur Vereinigung von Kavitationsvolumina im Spitzenwirbel weitere Erweiterungen und Verbesserungen, die über den Stand der Literatur hinausgehen, entwickelt und implementiert. Das Verfahren wurde in [3] der wissenschaftlichen Fachwelt vorgestellt.

## 5.1 Anbindung an ein RANS-Verfahren

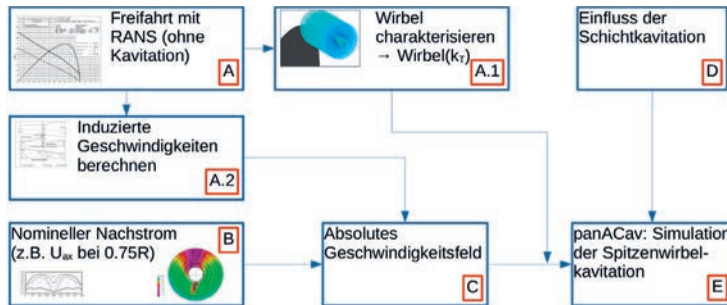


Abb. 9: Ablaufplan des Verfahrens panM-RANSHybrid.

Obwohl die Möglichkeit, Kavitation mit RANS-Verfahren zu simulieren, in den letzten Jahren deutliche Fortschritte gemacht hat, ist der Aufwand dafür sehr hoch. Um die Vorteile von RANS-Verfahren bei der Auflösung der Details der viskosen Strömung im Spitzenwirbel und die Effizienz des Randlelementverfahrens für die Spitzenwirbelkavitation zur Vorhersage der propellerinduzierten Druckschwankungen zu nutzen, wurde das Verfahren panM-RANSHybrid entwickelt, das panACav mit einem RANS-Verfahren verbindet.

Der Ablaufplan von panM-RANSHybrid ist in Abbildung 9 dargestellt. Mithilfe von Simulationen der Propellerfreifahrt werden äquivalente Strömungscharakteristika für eine achsensymmetrische Hintergrundströmung generiert, die als Eingabe in panACav für den Betrieb in einem inhomogenen Nachstromfeld verwendet werden. Dadurch kann insbesondere auch der die Wirbelströmung dominierende Aufrollvorgang hinreichend genau abgebildet werden. Die ausgewerteten Größen auf einer Ebene im Spitzenwirbel werden in Abbildung 10 dargestellt.

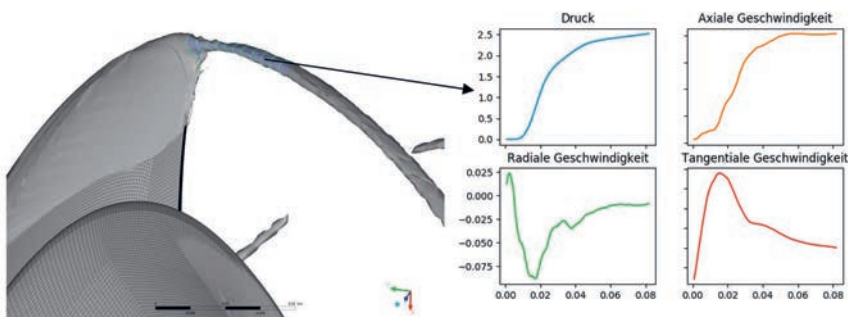


Abbildung 10: Umfangsmittelung der Größen aus einer RANS-Simulation für eine Ebene auf der Wirbelachse

Basierend auf der Belastungskurve eines Propellerblatts im Schiffsnachstrom wird die Wirbelströmung interpoliert. Zusammen mit Simulationen des Propellers mit Schicht-



kavitation können ohne eine aufwendige Simulation der Spitzenwirbelkavitation in RANS die propellerinduzierten Druckschwankungen bestimmt werden. Abbildung 11 zeigt eine gute Übereinstimmung beim Vergleich der simulierten mit den gemessenen Druckschwankungen der ersten fünf Blattfrequenzen

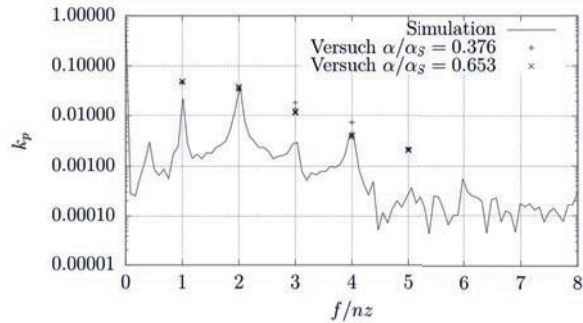


Abb. 11: Vergleich der Druckschwankungen einer Simulation mit panM-RANSHybrid mit Versuchsergebnissen

## 5.2 Anbindung an ein Paneelverfahren

Das Paneelverfahren für achsensymmetrische Kavitation panACav wurde an das bewährte Paneelverfahren für Maritime Anwendungen und Forschung panMARE angebinden. Weil das auf der Potentialtheorie basierende Verfahren panMARE keine Lösung für die viskose Strömung im Wirbelkern bietet, muss mit geeigneten Ersatzmodellen gearbeitet werden. Für die Kopplung der beiden Verfahren wurden neben der Strömung im Spitzenwirbel die Lage des Spitzenwirbels sowie Ersatzmodelle für die Interaktion der Schichtkavitation und das automatisierte Auslesen von Größen für die Ersatzmodelle implementiert. Abbildung 12 zeigt die Simulation der Spitzenwirbelkavitation mit panMemp.

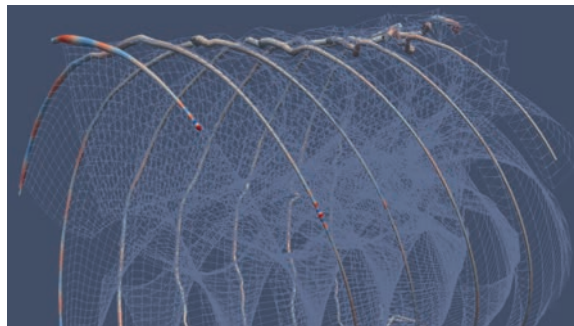


Abb. 12: Kavitierende Spitzenwirbel auf der freien Scherschicht in panMARE

# 6. ENTWICKLUNG UND EINSATZ MESSTECHNIKEN

## 6.1 Entwicklung eines SMART Dummymodells (SVA)

Für Versuche am Tragflügel im Kavitationstunnel K21 der Universität Rostock in Phase I, wurden eine Kavitationstunnelscheibe und ein Tragflügel in der SVA Potsdam gefertigt

und an die Universität Rostock übergeben. In Phase II fanden Untersuchungen in der kleinen Messstrecke des Kavitationstunnels K15A der SVA statt. Es wurde ein Propeller in einem axialen Nachstromfeld untersucht. Bei dem Versuchsaufbau wurde darauf geachtet, dass die Zuströmung zum Propeller in einem Berechnungsverfahren möglichst einfach erfasst werden kann. Weiterhin erlaubte der Versuchsaufbau einen äußerlichen optischen Zugriff zum Propeller von vier Seiten. Der Versuchsaufbau Propeller in einer axialen Nachstromdelle ist in Abbildung 13 dargestellt.

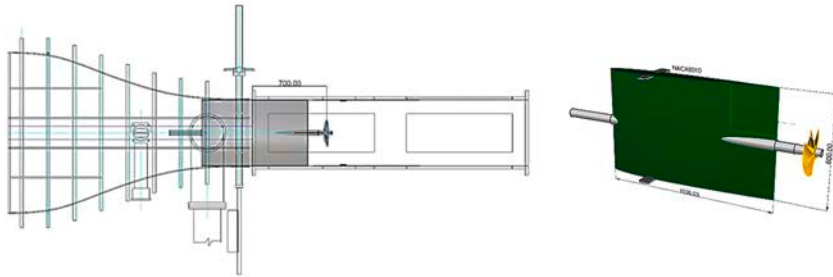


Abb. 13: Versuchsaufbau Propeller in axialem Nachstromfeld [1]

Zunächst wurde sichergestellt, dass das mittels numerischer Untersuchungen gewählte und aus SikaBlock gefertigte Profil NACA0010 die gewünschte axiale Nachstromdelle generiert. Anschließend fanden die Versuche am umströmten Propeller statt. Die SVA bestimmte die vom Propeller induzierten Druckschwankungen im axialen Nachstromfeld des NACA Profils. Dafür wurden 30 Drucksensoren oberhalb des Propellers in dem zum Tragflügel gehörenden Dummymodell angeordnet (Abbildung 14)

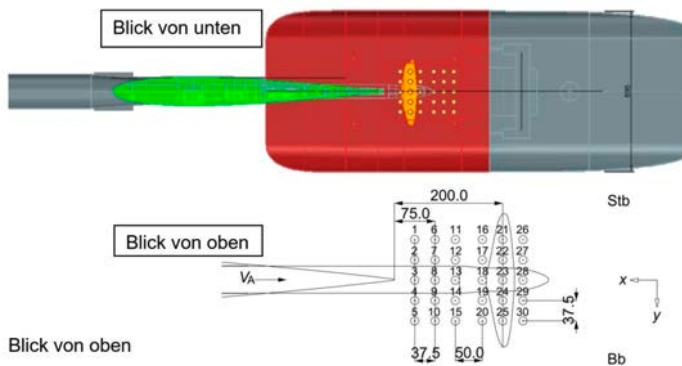


Abb. 14: Anordnung der Drucksensoren im Dummymodell [4]

Ein Eindruck des Umfangs der akustischen und optischen Messtechnik der Universität Rostock in der SVA lässt sich von Abbildung 15 bis Abbildung 17 gewinnen.



Abb. 15: Optisches Messsystem der Universität Rostock (IAE) – Kameras (Bb) [5]



Abb. 16: Lichtpanel, Speichermodule (Stb) Abbildung 17: Kameras, Hydrofone (unten)

In Phase III fanden die Untersuchungen des INT und des IAE der Universität Rostock mit dem weiter unten beschriebenen Messsystem in der großen Messstrecke des Kavitationstunnels der SVA statt. Es wurden sowohl das akustische, sowie das optische Kavitationsverhalten des Propellers im Nachstromfeld des Schiffes betrachtet, siehe Abbildung 18. Auch hier erfolgten zusätzlich Messungen durch die SVA um die propellerinduzierten Druckschwankungen zu analysieren.

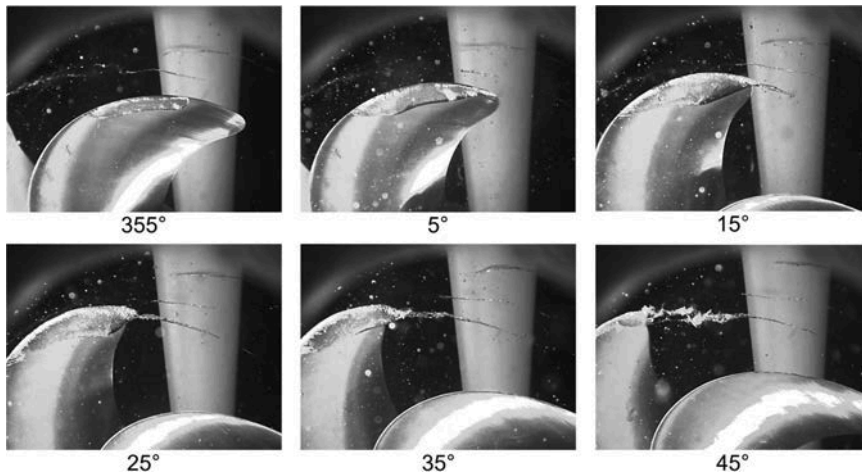


Abb. 18: Kavitationserscheinungen am Propeller am konventionellen Dummymodell im Betriebspunkt OP (Videoaufnahmen der SVA aus dem Dummymodell)

Gewöhnlich erfolgt die Simulation des Nachstromfeldes im Modellversuch mittels eines maßstäblich skalierten Dummymodells, welches mit zusätzlich angebrachten Sieben den durch verschiedene Reynoldszahlen unterschiedlichen Nachstrom der Großausführung produziert. Im Rahmen des Projektes wurde untersucht, ob mit Hilfe eines sogenannten Smart Dummymodell auf die Zusatzsieve verzichtet werden kann. Die Geometrie des Smart Dummymodells wurde derart verzerrt, dass auf die bisher im Einsatz befindlichen Zusatzsieve zur Aufweitung der Nachstromdelle verzichtet werden konnte. Dadurch musste beim Smart Dummymodell allerdings die geometrische Ähnlichkeit im Hinter-schiffsbereich zum Teil vernachlässigt werden.

In Phase II wurde Folgendes festgestellt: Um die Druckschwankungen näher zu betrachten, war ein Betriebspunkt, in dem die Druckschwankungsamplituden in den höheren Harmonischen hinter dem Propeller auch in größerer Entfernung nur langsam abnahmen und vor dem Propeller mit dem Abstand abnahmen und in größerer Entfernung klein waren, von Interesse. Es zeigte sich, dass die Drehzahl des Propellers und der Gasgehalt des Wassers keinen signifikanten Einfluss auf die Kavitationsbeobachtungen haben. Diese Beobachtung wird durch die gemessenen Druckschwankungen bestätigt. Eine Verringerung der Kavitationszahl bewirkte allerdings eine deutliche Anhebung der Druckschwankungsamplituden in der 1. bis 3. Ordnung.

Die Untersuchungen am Schiff mit Propeller mit dem Smart Dummymodell zeigten in der axialen Geschwindigkeitsverteilung eine gute Übereinstimmung mit den am Schiff berechneten Werten (Abbildung 19).

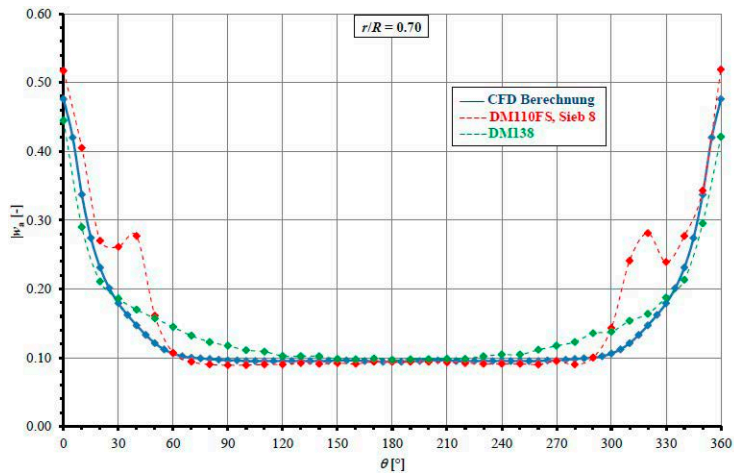


Abb. 19: Vergleich der axialen Nachstromwerte bei  $r/R = 0.70$  zwischen dem Smart Dummymodell (grün), dem „konventionellen“ Dummymodell (rot) und der Großausführungsberechnung (blau)

Detailuntersuchungen ergaben jedoch, dass die Strömung am Hintersteven ablöst, was zu instabilen Kavitationserscheinungen führte. Generell ist zu sagen, dass der Einsatz von Smart Dummymodellen für axiale Strömungsbeobachtungen möglich ist, wenn die Nachstromdelle eine moderate Breite aufweist. Um im weiteren Verlauf des Projektes die Ablösungen zu verhindern, wurde ein schlankeres Smart Dummymodell entworfen, welches aber mit Zusatzsieben versehen wurde, um die korrekte Nachstromdellenbreite zu erreichen. Die Kavitation am Propeller ist bei den Versuchen mit dem schlankeren Smart Dummymodell geringer ausgebildet, als beim Versuch mit dem konventionellen Dummymodell [6]. Dies gilt für die Kavitationsausdehnung wie für die Kavitationsschichtdicke. Die Druckschwankungsamplituden des Propellers zwischen Smart Dummymodell und konventionellem Modell lagen teilweise in der gleichen Größenordnung oder fielen beim Smart Dummymodell kleiner aus [4].

## 6.2 Entwicklung eines Multi-Kamera-Messsystems

### ÜBERBLICK

Im Projekt wurde in Zusammenarbeit der Projektpartner IAE und FORTech ein Multi-Kamera-Messsystem entwickelt und eingesetzt, welches zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen der Schicht und Spitzenwirbelkavitation ermöglicht. Während der Entwicklung wurden zwei Problemfälle untersucht.

Die Entwicklung und Testung des Messsystems erfolgte am HiOfoil im Kavitationskanal K21 der Universität Rostock. Hier wurden kurze Sequenzen eines Kavitationsvorganges am stationären Flügel mit Hochgeschwindigkeitskameras und Hydrophon-Arrays aufgenommen und die großen Datenmengen offline verarbeitet. Im anschließenden Schritt wurden längere, phasenaufgelöste Bildsequenzen des Kavitationsvorganges am Propeller mit normaler Kamerageschwindigkeit im K15A beim Projektpartner SVA weitestgehend automatisiert aufgenommen und ausgewertet.



Die Konfiguration und Kalibrierung eines Setups erfolgt vom Steuer- und Messrechner, der sogenannten Measurement Workstation (MWS). Kernstück der Synchronisation ist die Capture Control Unit (CCU). Sie ermöglicht es, bis zu 40 verschiedene Geräte wie Kameras, Objektive, Blitze und externe Systeme (z.B. Akustik) mit 10ns Zeitauflösung zu synchronisieren. Die Synchronisationssignale werden über störunempfindliche LVDS-Leitungen an die einzelnen Subsysteme weitergeleitet. Ebenfalls wurden Treiberschaltungen für kommerzielle Industriekameras entwickelt und an die Problemstellung angepasste LED-Blitz-Panels aufgebaut. Damit wird es möglich, phasenaufgelöste Messungen der Spitzenwirbelablösung zu erfassen und dabei parallel akustische Aufnahmen zu synchronisieren. Die Bilddatenströme werden von einer Vielzahl von Embedded Computern entgegengenommen und zwischengespeichert. Nach der Bildakquise erfolgt die offline-Verarbeitung. Das komfortable Einstellen der nötigen Trigger-Timings zwischen Kameras und Blitzlicht-Treibern gelingt durch die Capture Control Unit. Weiterhin können mittels CAN-Feldbus die verwendeten Flüssiglinseobjektive der Kameras fokussiert werden und die Lichtmenge der Blitztreiber gesteuert werden.

## ERGEBNISSE

### Analyse der Kavitation am Tragflügel

Im Kanal K21 der Universität Rostock wurden Hochgeschwindigkeitsvideos für die Charakterisierung der Dynamik und Multi-View-Aufnahmen für die Lokalisierung der Spitzen- und Schichtkavitation aufgenommen (Abbildung 22).

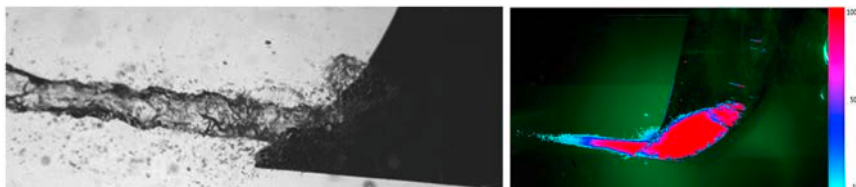


Abb. 22: Visualisierung der Kavitationsbereiche am Tragflügel als Overlay. In der Skala rechts im Bild ist die Zuordnung der Farbkodierung zu Häufigkeit der beobachtbaren Kavitation dargestellt.

Für die Bestimmung der Kavitationsgebiete am Tragflügel kommen Segmentierungen mittels Hintergrundsubtraktion zum Einsatz (Abbildung 22 links). Der Verlauf des Spitzenwirbels wird durch 3D-Rekonstruktion der Spitzenwirbeltrajektorie erreicht. Dies gelingt mittels zueinander extrinsisch kalibrierter Kameras die sehr kurz nacheinander (ca. 10 $\mu$ s) Schattenabbildungen des Spitzenwirbels aus unterschiedlichen Perspektiven erfassen, siehe Abbildung 23. Dabei erfolgt zunächst eine Segmentierung des Spitzenwirbels, die Schätzung des Verlaufes der Mittellinie des Wirbels in 2D (Abbildung 23 links) und danach die Bildung der 3D-Trajektorie im Raum (Abbildung 23 rechts).

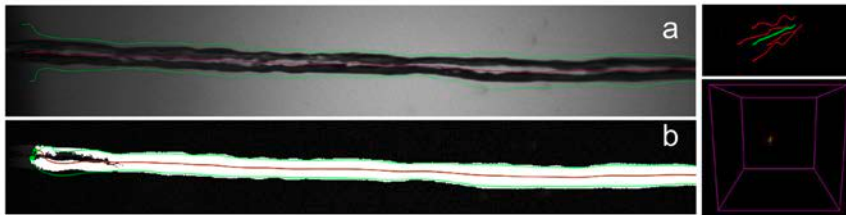


Abb. 23: Links (a) Erfolgreiche Anwendung des `line_gausss`-Operators auf die Rohbilder und (b) Segmentierung bzw. Binarisierung mit erfolgreich im Nachverarbeitungsschritt gefundener 2D-Trajektorie (rot), Rechts positions- und maßstabsrichtige Darstellung des 3D-Wirbel Datensatzes (unten) und Vergrößerung des detektierten Trajektorienmodells mit Einhüllender (rot), berechnet hier aus zwei Kameraperspektiven.

### Analyse des kavitierenden Propellers

Nach Entwicklung und Testung des Systems in Rostock wurden die Kavitationsdynamik des Spitzenwirbels und der Schichtkavitation parallel zu akustischen Messungen in zwei Messkampagnen an einem Modellpropeller im Kanal des Projektpartners SVA aufgenommen. Der Spitzenwirbel des Propellers weist, im Gegensatz zum Spitzenwirbel des starren Tragflügels, eine starke räumliche und zeitliche Abhängigkeit in Form einer sich drehenden Helix auf. Die gesamte Belichtung und Bildaufnahme der 14 parallel verwendeten Kameras musste auf die Phase des Propellers synchronisiert werden. Durch die Entwicklung des Multi-Kamera-Systems wurde es möglich, die Schichtkavitation und den Spitzenwirbel aus verschiedenen Perspektiven in einem genauen Timing-Schema abzutasten und zu vermessen. Die Bestimmung der Kavitationsdynamik wurde synchron mit akustischen Messungen des Projektpartners INT am K21 in Rostock und am K15A in Potsdam trotz der zwischenzeitlich aufgetretenen Corona-Pandemie durchgeführt. Eine breite Datenbasis von mehr als 20 Terrabyte Umfang wurde bei verschiedenen Betriebszuständen und hydrodynamischen Bedingungen aufgezeichnet und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Für die Auswertung und Zusammenführung der Bilddaten der Kameras mit unterschiedlichen Beobachtungsbereichen wurden ein Helixmodell der Spitzenwirbel erstellt (Abbildung 24) und die Parameter des Modells anhand der realen Bilddaten mittels Gauss-Newton-Verfahren optimiert. Ist die Optimierung des Helix-Fittings abgeschlossen, ist damit auch die 3D-Transformation zwischen Propellerkoordinatensystem und dem Kamerakoordinatensystem gefunden. Beispielhaft zeigt Abbildung 25 das Modellfitting für einen Bilddatensatz der Propellermessungen an der SVA am K15A.



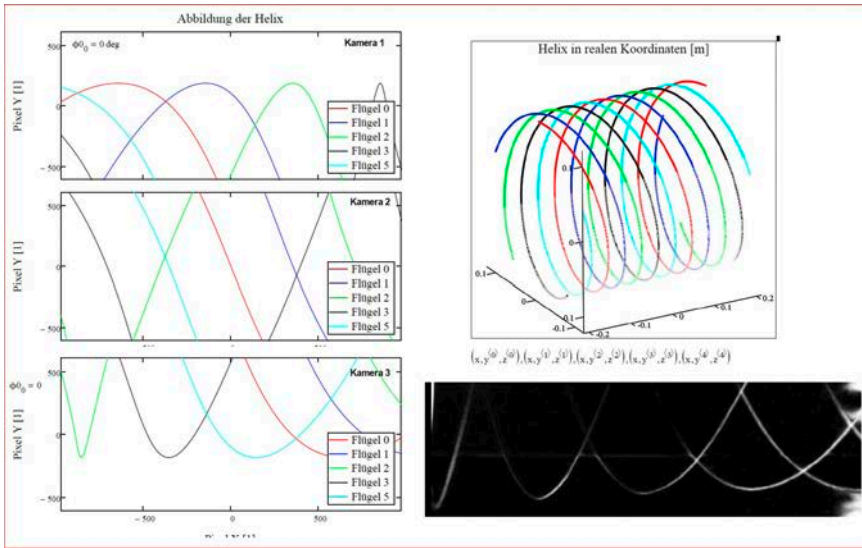


Abb. 24: Visualisierung des Spitzenwirbel-Helixmodells für fünf Blätter, parametrisiert mit Standardparametern. Links: Ansicht aus drei gewählten Kameraperspektiven, rechts oben: gesamtes Modell in 3D-Darstellung, rechts unten: Beispielhafte Teilaufnahme des unteren Helix-Bereichs.

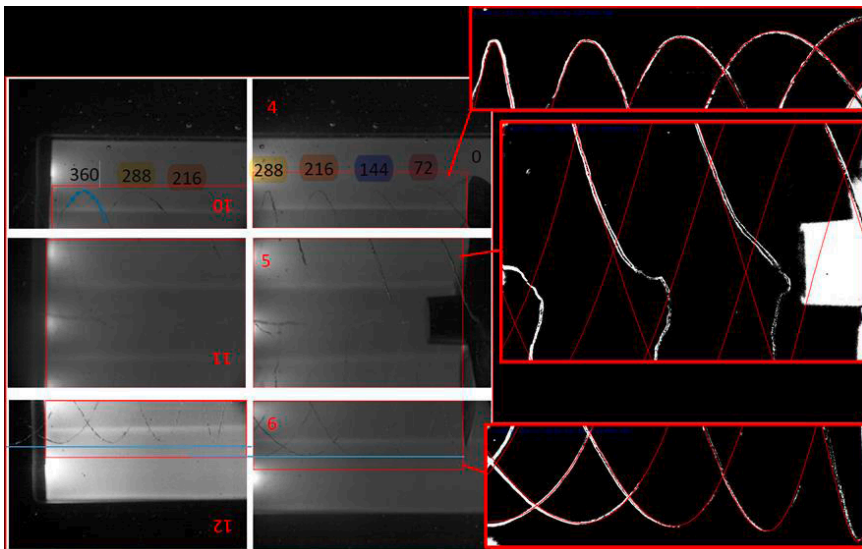


Abb. 25: Helix-Fitting für CAM4, CAM5 und CAM6 eines repräsentativen Datensatzes, aufgenommen an der SVA. Links angedeutet sind die in annähernd richtiger Position zueinander gebrachten Ausgangsbilder. Die Annotationen [0, 72, 144, 216, 288 und 360] in den Rohbildern von CAM10 und CAM4 sind Markierungen der Phasenwinkel [in Grad] der einzelnen Helix-Spiralen der fünf Propellerblätter.

Ist die Lage der helixförmigen Spitzenwirbel-Struktur in den Bildern erfasst, lassen sich aus den umfangreichen Bilddaten statistische Kenngrößen, wie Wahrscheinlichkeit des Auftretens, örtliche Stabilität, Durchmesser und Dynamik des Spitzenwirbels ableiten.

### Perspektivische Verwertung der Projektergebnisse

Die im Projekt entwickelte Messtechnik zur synchronisierten orts- und zeitaufgelösten optischen Erfassung der Kavitationserscheinungen, sowie die Auswertalgorithmen wurden nach dem Projektende in Zusammenarbeit von FORTECH und IAE soweit vorangetrieben, dass der Projektpartner SVA die Messtechnik zum Ende des Jahres 2021 dauerhaft vor Ort in Betrieb nehmen kann. Die Technik wird sowohl im Kavitationstunnel der Uni Rostock, als auch beim Projektpartner SVA für die Untersuchungen und Quantifizierung von Kavitationsphänomenen eingesetzt werden und steht für weitere Forschung und Entwicklung zur Verfügung.

## 7. GROSSAUSFÜHRUNGSMESSUNGEN

### 7.1 Messungen mit dem Multi-Kamera-Messsystem

Großausführungsmessungen sind durch die Corona-Pandemie in der Projektlaufzeit nicht möglich gewesen, da keine Versuche an Bord der mit Bullaugen ausgerüsteten Schiffe „Amandine“ oder „Loch Seaforth“ durchgeführt werden konnten. Der Zutritt zu den international verkehrenden Schiffen war nicht möglich. Trotzdem wurde im HiOCav-Projekt vom IAE eine Boroskop-Messtechnik (Abbildung 26) zur Abbildung der Kavitation im Propellerbereich entwickelt. Diese steht für zukünftige Messungen und Projekte zur Verfügung.

Die in eine Schraube integrierte Miniatur-Kamera kann in vorhandene Bohrungen für Druckdosen eingeschraubt werden. Diese Bohrungen sind wesentlich häufiger als Bullaugen an Schiffen vorhanden. Die Technik ermöglicht eine Wellen-synchrone Beobachtung der Kavitation mit bis zu 500 Bildern/s unter dem Schiffsrumpf ohne den Aufwand vom Bullaugen-Einbau.

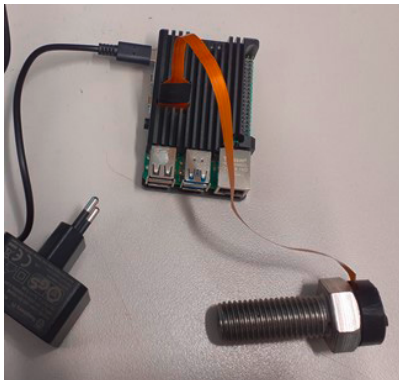


Abbildung 26: Foto der entwickelten Boroskop-Messtechnik

### 7.2 Akustische Messungen zur Bestimmung von Einsatz und Art der Kavitation

Im Rahmen des Vorhabens wurden seitens tk MS akustische Messungen an der Großausführung durchgeführt und auf neuartige Weise ausgewertet. Dabei lag der Fokus auf der

automatischen Erkennung von Kavitationsereignissen und auf der Unterscheidung verschiedener Kavitationsarten. Ausgehend von den gemessenen Zeitreihen wurden dabei Spektrogramme berechnet. Von letzteren wurden mathematische Eigenschaften bestimmt und zur Klassifikation verwendet. Eine Beschreibung eines vergleichbaren Vorgehens durch den Projektpartner Universität Rostock findet sich in [7].

Eine besondere Herausforderung ist dabei die Qualität der Messdaten in Bezug auf Rauschanteil und anderen Nebengeräuschen, sowie die Aufnahmefrequenz. Theoretisch ergeben sich durch Implosion bei typischen Blasengrößen Frequenzbereiche zwischen 10 kHz und weit über 100 kHz, siehe [8] und [9]. Praktisch sind schon im Bereich zwischen 80 Hz und 5 kHz Pegelerhöhungen feststellbar. Für diese hohen Frequenzen muss spezielle Messtechnik verwendet werden, da insbesondere das aufgenommene Datenvolumen pro Zeit sehr groß ist. Bei Verwendung von Frequenzen unterhalb 2kHz kann nach [7] jedoch bereits eine Erkennung von Kavitation gelingen.

Im Vorhaben wurde mithilfe eines Ansatzes von Machine Learning eine Methode erstellt, um aus den genannten Eigenschaften der akustischen Signatur eine Klassifizierung unterschiedlicher kavitierender Zustände zu ermöglichen. Als Maß für die Güte der Klassifikation wird das F1-Maß verwendet, welches sich aus Genauigkeit und Trefferquote kombiniert, wobei ein F1-Wert von 0 keiner und ein Wert von 1 einer perfekten Übereinstimmung entspricht. Ein erster Schritt der Zuordnung nach unterschiedlichen Betriebspunkten ist die Betrachtung stationärer Fahrt bei unterschiedlichen Drehzahlen und bei unterschiedlichen Tauchtiefen, wobei der Propeller nicht kavitiert. Die Ergebnisse für stationäre Betriebspunkte für zwei Zustände (DD und PD) sind in Abbildung 27 als sog. Wahrheitsmatrizen dargestellt. Diese verbildlichen die erkannte Klasse im Vergleich zur tatsächlichen, wobei eine ideale Besetzung der Diagonale  $F1=1$  entspricht. Der F1-Score ist für die DD-Betriebspunkte 0,823 und für die PD-Betriebspunkte 0,792. Zum Teil ist erkennbar, dass benachbarte Betriebspunkte nicht eindeutig voneinander unterschieden werden können. Bemerkenswert ist, dass jeweils deutlich andere Eigenschaften für die Klassifikation der unterschiedlichen Zustände bedeutend sind.

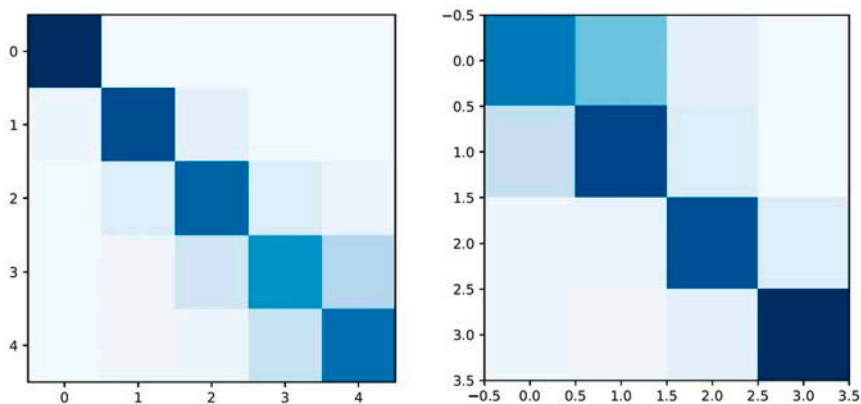


Abbildung 27: Wahrheitsmatrizen für stationäre Betriebspunkte DD (links) und PD (rechts) bei jeweils getrennter Klassifikation

Es wurden Versuche zur Unterscheidung von Kavitationsarten mit zwei unterschiedlichen Schiffen unternommen, jedoch konnte durch die Umgebungsbedingungen keine befriedigende Korrelation der Zustände erreicht werden. Für keine der Fahrten ergab sich ein F1-Maß von mehr als 0,3. Durch Fehlerquellen in der Leistungsbestimmung, die nicht exakte Kenntnis des instationären Motorwirkungsgrades sowie anderer Verluste und zeitlich verschieden aktueller Messdaten entstehen Ungenauigkeiten, die eine genaue Zuordnung des Betriebspunktes zu einer Kavitationsart verhindern. Mit der vorgestellten Methode konnte lediglich der kavitierende vom nicht-kavitierenden Zustand unterschieden werden. Daher wurden in einem zweiten Schritt unterschiedlich stark kavitierende Zustände betrachtet und dafür schnelle Beschleunigungsmanöver ausgewertet, bei denen starke Kavitation auftritt. Die Manöver können manuell in Zeitbereiche mit unterschiedlichem Höreindruck unterteilt werden. So werden beispielsweise leise Bereiche vor der Beschleunigung, massive Kavitation, schwächere Kavitation, intermittierende Kavitation und nicht mehr kavitierende Bereiche bei schneller Fahrt unterschieden. Das Ergebnis bei getrennter Klassifikation ist gut, es ergeben sich die in Abbildung 28 dargestellten Wahrheitsmatrizen mit F1-Maßen von 0,995 (links) und 0,900 (rechts).

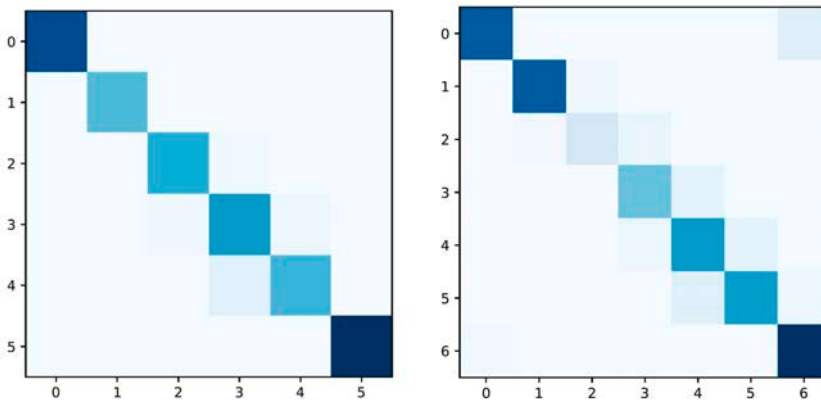


Abbildung 28: Wahrheitsmatrizen für instationäre Betriebspunkte bei jeweils getrennter Klassifikation

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem vorgestellten Verbundvorhaben HiO cav wurden vielfältige numerische und experimentelle Verfahren entwickelt und zur Anwendung gebracht. Die Verfahren werden teilweise bereits erfolgreich eingesetzt, teilweise haben sich neue Fragestellungen eröffnet. Insgesamt konnte die Forschung zu den Auswirkungen hochdynamischer Propellerkavitation durch die beteiligten Universitätsinstitute und Wirtschaftsunternehmen deutlich vorangetrieben werden.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Namen aller Projektpartner für die finanzielle Förderung des Verbundvorhabens. Weiterhin gilt dem Projektträgers Jülich (PTJ) Dank für die administrative Unterstützung von HiO cav.

## LITERATUR

- [1] H.-J. Heinke, „Kavitationsversuche mit dem Propeller P1724 im Nachstrom eines NACA0010 Profils,“ Bericht 4822, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Februar 2019.
- [2] J.-K. Choi und G. L. Chahine, „Non-Spherical Bubble Behaviour in Vortex Flow Fields,“ Computational Mechanics, 2003.
- [3] R. Gosda, R. Peric und M. Abdel-Maksoud, „Simulation of Linear and Non-Linear Dynamics of Tip-Vortex Cavities with a Panel Method Using Explicit Relaxation Zones,“ in 11th International Symposium on Cavitation (CAV2021), 2021.
- [4] H.-J. Heinke, „Kavitationsversuche und Druckschwankungsmessungen mit dem Propeller P1724 im Nachstrom eines NACA0010 Profils,“ Bericht 4823, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Februar 2019.
- [5] H.-J. Heinke, „Kennwerte des Propeller P1724 im Nachstrom eines NACA0010 Profils in den Messungen der Universität Rostock (IAE, INT),“ Bericht 4921, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, Januar 2020.
- [6] H.-J. Heinke und E. Schomburg, „Erprobung Nachstromfeldsimulation mit einem Smart Dummymodell (Dummymodell DM138.1 ohne und mit Sieb, Propeller P1724),“ Bericht 4862.1, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam, September 2019.
- [7] C. Krüger, S. Spors und A. Wolter, „Pattern Recognition in Hydroacoustic Cavitation Measurements,“ in Proceedings of Sixth International Symposium on Marine Propulsors, Rome, Italy, 2019.
- [8] X. Lurton, An Introduction to Underwater Acoustics - Principles and Application, Plouzané, France: Springer-Verlag, 2002.
- [9] C. E. Brennen, An Internet Book on Fluid Dynamics, <http://brennen.caltech.edu/FLUIDBOOK/>, 2006.



# ESD@SEA –

ENTWURF VON PROPULSIONSVORBESSERNDEN MASSNAHMEN BEI BETRIEBSBEDINGUNGEN

## AUTOREN

<b>PROF. DR.-ING. STEFAN KRÜGER</b>	TU HAMBURG, HAMBURG
<b>BJÖRN CARSTENSEN</b>	TU HAMBURG, HAMBURG
<b>JOHANNES WILL</b>	VAN DER VELDEN BARKEMEYER GMBH, HAMBURG
<b>FRAHAN MATIN</b>	VAN DER VELDEN BARKEMEYER GMBH, HAMBURG
<b>LUTZ KLEINSORGE</b>	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH, WAREN
<b>RAINER GRABERT</b>	SVA POTSDAM GMBH, POTSDAM

## EINLEITUNG

Die Neuausrichtung der maritimen Industrie in Deutschland hat sich im Wesentlichen auf komplexe Spezialschiffe (Werften), Offshore-Anlagen für Wind, aber auch Öl und Gas (Ingenieurbüros und Dienstleister), sowie Systemkomponenten für weltweite Werften (Zulieferer) fokussiert. Das schließt die gesamte Phase des Schiffsbetriebes und aller Systeme mit ein, denn nur mit reduzierten Lebenszykluskosten ist eine Steigerung der Produkt-effizienz gegenüber kostengünstigen außereuropäischen Mitbewerbern zu erreichen.

Ziel des hier beschriebenen Vorhabens war es, die Wirkungsweise von bestimmten Energy Saving Devices (ESDs) zur Leistungsreduzierung bei Schiffen über die zur Auslegung vorgegebenen Designbedingungen hinaus für realistische Betriebskollektive zu analysieren und diese Erkenntnisse zur Produktverbesserung mit Hinblick auf den realen Schiffsbetrieb zu nutzen. Abhängig von der Routenplanung bzw. Erfahrungen der Reedereien werden die häufigsten Betriebszustände für die Optimierung gewichtet. Damit folgt das Vorhaben der Logik, auch ESDs entgegen der bisherigen Praxis nicht mehr nur für einen einzigen Entwurfspunkt hin zu entwerfen, sondern für ein statistisch abgesichertes Kollektiv aus mehreren Betriebspunkten.

Auch wenn die grundsätzliche Thematik sehr weit gefasst werden kann, wurden im Rahmen des Vorhabens aus Gründen der Effizienz nur solche ESDs untersucht, die grob nach dem Tragflügelprinzip funktionieren und auch so berechnet werden und die auch Teil des Portfolios der antragsstellenden Industriepartner sind. Das schließt Propeller-Nabenkappenflossen, Vordrall-Leitflossen oder Düsen und das Ruder einschließlich asymmetrischer Ruder, Propulsionsbirnen und Ruderfinnen ein.

Für die Entwicklung von ESDs mithilfe derzeit gängiger Verfahren (Optimierungsalgorithmen, CFD-Berechnungen und Modellversuchen) findet der Entwurf praktisch

immer unter idealisierten Bedingungen (Geradeausfahrt, Glattwasser, kein Steuern, also Ruderwinkel von  $0^\circ$ ) statt. Diese idealen Bedingungen entsprechen jedoch nicht dem tatsächlichen Betrieb. Es ist aber davon auszugehen, dass die genannten Umweltbedingungen und die daraus resultierenden Bewegungen von Schiff und Steuerorgan sich unterschiedlich auf die Wirkung der einzelnen ESDs sowie auf die Wechselwirkung zwischen ESD und dem Gesamtsystem auswirken. Gesicherte qualitative oder quantitative Erkenntnisse liegen bisher kaum vor. Der Entwurf von schiffbaulichen Teilsystemen (wie ESDs) unter realistischen Betriebsbedingungen stellt also ein wichtiges Forschungsziel dar, welches in mehreren Schritten realisiert werden soll.

Weiterhin mussten im Rahmen des Vorhabens die bekannten Berechnungsmethoden teilweise neu entwickelt werden. Denn grundsätzlich sollen nur sehr geringe Leistungsunterschiede in Betriebszuständen von Komponenten der Zulieferer bewertet werden, wofür die bisher bewährten Methoden (auch experimentelle) nur eingeschränkt geeignet sind. So ist es schon in Modellversuchen unter idealen Bedingungen schwierig, eine Leistungserparnis von 1% an ESDs verlässlich messen zu können, vor allem, wenn die Schiffe bei extrem niedrigen Geschwindigkeiten betrieben werden und die Versuche bei großen Maßstäben durchgeführt werden müssen. Daher wurden im Rahmen des Vorhabens nicht nur neue Berechnungstechniken, sondern auch neue Versuchsmethoden entwickelt.

## 2. STATISTISCHE BETRIEBSPROFILE

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Methode zur Vorhersage von statistischen Betriebsprofilen für seegehende Schiffe basiert auf Vorarbeiten von Eljardt [7] und Greitsch [8] und wurde im Rahmen des Vorhabens erheblich erweitert [14]. Die Methode gliedert sich in vier Abschnitte. Zunächst wird das zu untersuchende Betriebsprofil aus einer geringen Anzahl an kumulativen Verteilungsfunktionen (CDF) von Eingangsgrößen zusammengestellt. Als schiffsseitigen Eingangsgrößen werden lediglich die Verteilungsfunktion der Geschwindigkeit und zur Beschreibung der Schwimmelage Verteilungsfunktionen einer eingeschränkt frei wählbaren Kombination aus Trimm, Tiefgang am vorderen Lot, in der Schiffsmittle (in Längsrichtung) oder am hinteren Lot benötigt. Zur Beschreibung der Umweltgrößen werden Verteilungsfunktionen für die Wasserdichte und -temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, sowie Strömungsgeschwindigkeit und -richtung benötigt. Solche Verteilungen können aus verschiedenen Quellen gewonnen werden (z. B. Noont-Noon-Data). Im Rahmen des Vorhabens wurden verschiedene Bordmessungen dazu verwendet, solche Betriebsprofile zu bestimmen, die entsprechend normiert im System hinterlegt wurden. Nach der Zusammenstellung der Verteilungen für die Eingangsdaten werden im zweiten Abschnitt die zu berechnenden Betriebspunkte des Betriebsprofils mit einer Monte-Carlo Simulation generiert. Dazu wird mithilfe eines Zufallsgenerators eine gleichverteilte Zufallszahl gezogen, die dann als Wahrscheinlichkeit aufgefasst wird. Mit dieser Wahrscheinlichkeit wird aus der zugehörigen CDF des Betriebsprofils das entsprechende Ereignis gezogen. Sind alle CDF auf diese Weise abgearbeitet, entsteht daraus ein Betriebspunkt. Die so generierten Betriebspunkte werden daraufhin im dritten Abschnitt mit einer Manövriermethode analysiert, die auf dem



Kraftmodell [16] basiert und fortwährend erweitert wurde [9,12, 13, 17]. Für jeden Betriebspunkt wird ein Gleichgewicht aus den am Schiff angreifenden Kräften berechnet, sodass das Schiff seinen Kurs hält. Die Umweltlasten aufgrund von Seegang werden mittels einer erweiterten Streifenmethode [1] auf das Modell aufgebracht, die Windkräfte werden nach Blendermann [2] gewonnen. Das Kurshalteproblem des Schiffes unter Umwelteinflüssen wird somit als Manövrierproblem aufgefasst. Daraus ergeben sich dann der Driftwinkel und der Ruderwinkel des Schiffes. Aus der für den Gleichgewichtszustand ermittelten Propellerdrehzahl und dem Propellermoment wird dann die Leistung bestimmt, die das Schiff in diesem Betriebspunkt benötigt. Die Clusterung der während der Betriebsprofilsimulation auftretenden Zustände führte zu einer erheblichen Verminderung der Rechenzeit. Eine typische Betriebsprofilsimulation auf einem handelsüblichen PC oder Laptop dauert ca. 4 min, wenn 2000 Betriebspunkte berechnet werden. Abschließend werden im letzten Schritt die erzeugten Ergebnisse zusammengetragen und ausgewertet. Dabei werden die berechneten Größen wieder als Verteilungsfunktionen zusammengefasst und den Eingangsgrößen, oder sofern vorhanden den Referenzgrößen, gegenübergestellt. Hierbei können neben direkten Betriebsgrößen, wie der Antriebsleistung, dem Ruder- oder Driftwinkel, auch die Ergebnisverteilungen von verschiedenen Zwischenergebnissen und Wechselwirkungen, wie beispielsweise dem Nachstrom, Sog, Zuströmung zum Propeller oder Ruder, analysiert werden. Des Weiteren stellt das Programm eine Schnittstelle zu anderen Programmen bereit, sodass die berechneten Daten analog zu im Betrieb gemessenen Daten extern statistisch analysiert und bewertet werden können.

Abb. 1 zeigt exemplarisch die Qualität der mit dieser Methode erzielten Ergebnisse: Links ist der Vergleich zwischen der mit dieser Methode berechneten Antriebsleistung im Vergleich zu der gemessenen Leistung (N2N-Daten) zu sehen. Die Berechnung und Simulation passen über weite Bereiche sehr gut zusammenpassen. Damit ist es nun möglich, den statistischen Leistungsbedarf eines Schiffes im realen Betrieb für die Zwecke des Vorhabens ausreichend genau vorherzusagen zu können. Damit ist nun auch die ausreichend genaue Vorhersage des Einflusses von propulsionsverbessernden Maßnahmen möglich, wie Abb. 1, rechts, zeigt. Das Schiff hat als Retrofit-Maßnahme einen neuen Propeller erhalten, der einen besseren Wirkungsgrad gegenüber dem Originalentwurf hat und wurde mit Nabenkappenflossen ausgestattet. Darüber hinaus wurde ein neuer Bugwulst angebracht. Die durch diese Maßnahmen im Betriebskollektiv erzielte Verbesserung ist auf der rechten Seite gut erkennbar.

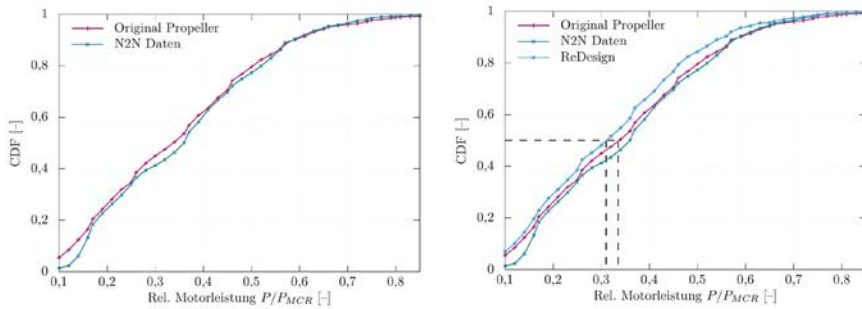


Abb. 1 Vergleich des simulierten Betriebsprofils mit den originalen Messdaten (links) und Bewertung eines Retrofits (rechts) für ein großes Containerschiff.

Auf Basis der so generierten statistischen Informationen ist es weiterhin möglich, propulsionsverbessernde Maßnahmen im Gesamtkontext bewerten zu können. Abb. 2, links, zeigt ein speziell für das Containerschiff entworfenes Ruder mit gewölbten Ruderprofilen. Dieses hat - neben einer geringeren Längskraft - vor allem einen neutralen Ruderwinkel, der dichter an 0 Grad liegt als der des Ausgangsruders. In der statistischen Simulation der im Betrieb auftretenden Ruderwinkel (Abb. 2, rechts) ist zu erkennen, dass die Verteilung derselben im Betrieb deutlich symmetrischer wird, woraus sich (neben dem reduzierten Widerstand) weitere Einsparungen im Schiffsbetrieb ergeben. Im Rahmen des Vorhabens wurden mit diesem Verfahren weitere ESDs untersucht, und die Methode befindet sich bei den Industriepartnern des Vorhabens in der Anwendung.

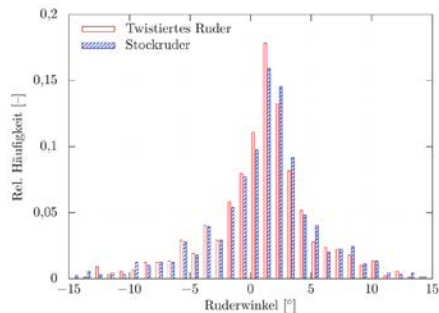
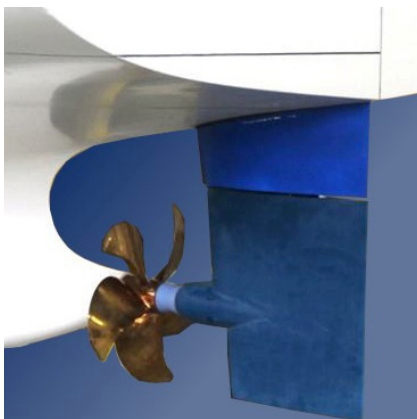


Abb. 2: Untersuchte Antriebskonfiguration am Modell (links) und Simulation der statistischen Verteilung des Ruderwinkels im Betrieb (rechts).

### 3. UNTERSUCHUNG VON MEHRKOMPONENTENPROPULSOREN

Neben der Untersuchung verschiedener Antriebskonfigurationen im Betriebsprofil ist die verlässliche Bestimmung der Kräfte aller an der Propulsion beteiligter Organe von zentraler Bedeutung. Für einen erfolgreichen, ganzheitlichen Entwurf spielen hierbei die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten eine wichtige Rolle. Für die

frühe Entwurfsphase wurden zu diesem Zweck potentialtheoretische Methoden weiterentwickelt. Darüber hinaus wurden viskose Methoden (RANS) für ein tiefer gehendes Verständnis der Wirkweisen und Wechselwirkungen der ESDs angewendet. Die Berechnungen wurden von dazugehörigen Modellversuchen gestützt. An diesen Versuchen konnten die Berechnungsmethoden validiert und der Erfolg der numerischen Optimierung der Entwürfe überprüft werden.

### 3.1. HYBRIDE POTENTIALTHEORETISCHE BERECHNUNGSVERFAHREN

Für den Basisentwurf der ESDs und auch des Propellers werden vor allem schnelle und zugleich ausreichend zuverlässige Verfahren benötigt. Damit kommen vor allem Randelemente-Verfahren (Wirbelgitter- oder Paneelverfahren) zum Einsatz. Auch wenn sich diese Verfahren bisher für Propeller oder Ruder bestens bewährt haben, so haben sie bei der Berechnung von Mehrkomponentenpropulsoren entscheidende Nachteile: Die Nachlaufflächen sind singulär, wodurch es zu erheblichen numerischen Problemen bei der Berechnung der induzierten Geschwindigkeiten an stromabwärts gelegenen Propulsoren kommt wenn diese von einem Wirbelement durchdrungen werden. Außerdem kann die freie Wirbelfläche im Nachlauf extrem stark deformiert sein (siehe Abb. 3), was ebenfalls zu erheblichen numerischen Problemen geführt hat.

Daher wurden im Rahmen des Vorhabens hybride Verfahren entwickelt, die das Problem in zwei Stufen lösen: Im ersten Schritt erfolgt eine reine analytische Lösung des Problems der Lage der freien Wirbel mithilfe der Biot-Savartschen Grundgleichungen, wobei der Propulsor mittels einer tragenden Linie modelliert wird (siehe Abb. 3). Ist die Lage des freien Wirbelsystems aus dieser Berechnung bekannt, kann die Lösung mit den bekannten, nachgelagerten, numerischen Verfahren erfolgen, wobei dann die Lage des freien Wirbelsystems nicht mehr innerhalb derselben iteriert werden muss. Geht man noch einen Schritt weiter, lässt sich mit diesem Ansatz auch das Durchdringungsproblem der freien Wirbel zunächst umgehen, wenn bei Mehrkomponentenpropulsoren auch die Lage der resultierenden freien Wirbel bestimmt wird und gleichzeitig die Zuströmung zu dieser Komponente auf dem direkten Wege mittels der von den freien Wirbeln induzierten Geschwindigkeiten berechnet wird. Mittels dieses Modellierungsansatzes wird eine erhebliche Flexibilität erlangt, denn hierdurch kann nicht nur jedes numerische Verfahren mit dieser Berechnungstechnik, sondern auch die einzelnen Verfahren für die verschiedenen Propulsorkomponenten untereinander gekoppelt werden.

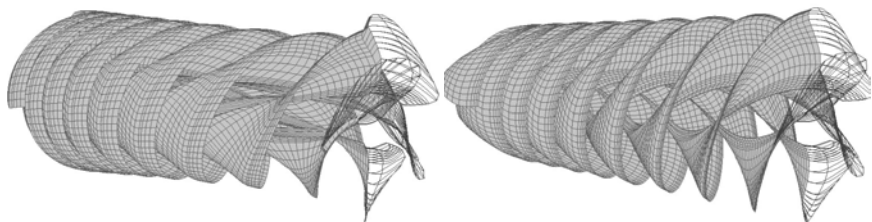


Abb. 3: Berechnetes freies Wirbelsystem eines Verstellpropellers für  $J=0$  (links) und  $J=0.9$  (rechts). In beiden Fällen ist der Aufrollvorgang sehr gut erkennbar.

Für die analytische Lösung wurden die aus der Propellertheorie bekannten Grundgleichungen nach Biot-Savart numerisch am Ort des tragenden Wirbels gelöst, um die wirbelinduzierten Geschwindigkeiten zu bestimmen [11]. Wenn Mehrkomponentenpropulsoren berechnet werden sollen, müssen die wirbelinduzierten Geschwindigkeiten auch vor oder hinter dem Propeller berechnet werden. Dazu wurden wiederum numerische Lösungen der Biot-Savart'schen Grundgleichungen in Form von Goldsteinfaktoren ermittelt. Die rechenintensive Lösung dieser Gleichungen muss lediglich einmalig durchgeführt und in Tabellenform hinterlegt werden. Für beliebige weitere Rechnungen kann anschließend in einer mehrparametrischen Kurvenschar interpoliert werden. Die Berechnung von nicht-rotierenden Propulsorkomponenten wird durch die bestimmten asymptotischen Entwicklungen für die Fälle von unendlicher Steigung als auch Nullsteigung der freien Wirbel ermöglicht. Auch für die Schräganströmung von Propulsoren, wie sie im realen Betrieb auftritt, konnten Erweiterungen der Goldstein-Faktoren berechnet werden. Durch das gewählte Vorgehen ist die eigentliche Propellerberechnung jetzt nicht nur extrem schnell, sondern es wurde auch die Ergebnisqualität merklich gesteigert.

Während der Entwicklungen wurde gleichzeitig ein konsistenter Übergang von der tragenden Linie zur tragenden Fläche geschaffen, weshalb aus den numerischen Berechnungen wiederum äquivalente 2D-Anstellwinkel gewonnen werden konnten. Dies ermöglicht, das bekannte Instrumentarium der Profiltheorie für den Flügelentwurf der Propulsoren zu verwenden. Dabei zeigt sich durchgängig, dass es am besten ist, den jeweiligen Flügelschnitt für die Bedingung des stoßfreien Eintritts zu entwerfen.

Aufbauend auf den bisher erzielten Ergebnissen für die Berechnung von Multikomponenten-Propulsoren auf Grundlage der Traglinientheorie konnte zunächst das bestehende Paneelverfahren [15] zur Ruderkraftberechnung erfolgreich erweitert und verbessert werden [4, 5, 6]. Bislang wurden die Nachlaufpaneele im Paneelverfahren auf einer geschätzten Ebene im Fluid angeordnet. Diese Anordnung berücksichtigt jedoch nicht die tangentielle Strömungskomponente hinter dem Propeller, die zu der in Abb.4 dargestellten Deformation des Wirbelsystems führt. Andere Techniken zur Ausrichtung der Nachlaufpaneele, beispielsweise iterative Verfahren, waren in der Vergangenheit nicht erfolgreich und haben gleichzeitig eine sehr hohe Rechenzeit aufgrund der Komplexität der Interaktion zur Folge. Diese Erfahrungen haben den gewählten hybriden Ansatz bestätigt. Nach der Ausführung des Paneelverfahrens zur Ruderkraftberechnung werden die induzierten Geschwindigkeiten des Ruders am Ort des Propellers und die Zirkulationsverteilung des Ruders bestimmt. Diese Ergebnisse werden anschließend genutzt, um die Traglinienmethode mit verbesserten Eingangsgrößen erneut auszuführen.

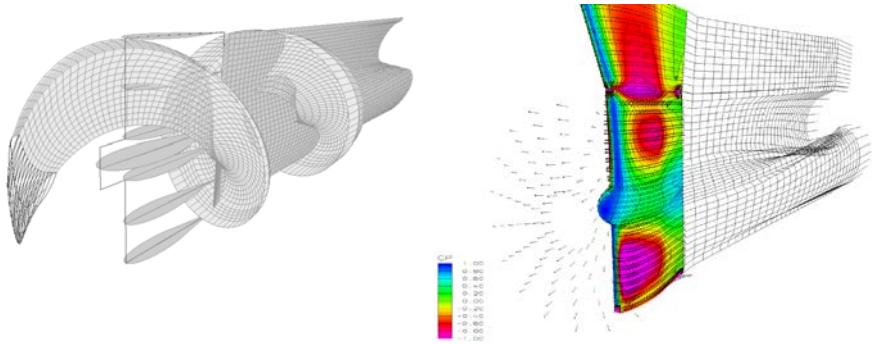


Abb. 4: Deformierte freie Wirbel aus der kombinierten Traglinienrechnung für Propeller und Ruder (links) und mit dem Paneelverfahren berechnete Druckverteilung auf dem Ruder und induziertes Geschwindigkeitsfeld in der Propellerebene (rechts).

Neben Rudern, Nabenkappenflossen und Finnen sollen auch andere Anordnungen berechnet werden können. Daher wurde im Sinne einer Flexibilisierung der Anwendungsfälle die Routinen soweit verallgemeinert, dass damit beliebige Propulsoren gerechnet werden können, die aus Tragflügeln bestehen - also Nabenkappenflossen, Tandem-Propeller, Gegenlaufpropeller und feststehende Statoren vor und hinter dem Propeller. Für das so entwickelte Verfahren konnte der im BMWI-Vorhaben EPROSYS [10] untersuchte Tandem-Propeller als weiterer Validierungsfall genutzt werden. Dessen Entwurf ist seinerzeit misslungen, weil es kein sinnvolles Berechnungsverfahren gab, welches die Interaktion der beiden Propeller korrekt erfassen konnte. In Abb. 5 ist das Freifahrt diagramm des Tandem-Propellers dargestellt. Das gekoppelte Traglinienverfahren prognostiziert den Schub des gut (gestrichelte Linie), das Moment zeigt hingegen noch gewisse Abweichungen. Mithilfe eines neu entwickelten hybriden Wirbelgitterverfahrens [3], können die Ergebnisse noch einmal deutlich verbessert werden (strichpunktierte Linie), sodass nun auch eine zufriedenstellende Genauigkeit in der Berechnung des Momentes erzielt werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass der neue Berechnungsansatz eine erhebliche Weiterentwicklung darstellt.

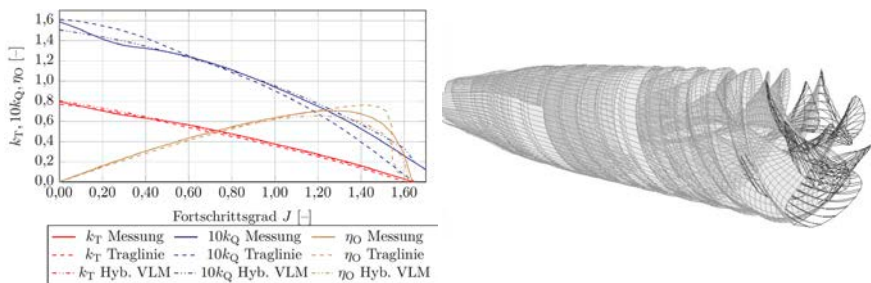


Abb. 5: Berechnete Freifahrt im Vergleich zur Messung für den EPROSYS Tandem-Propeller (links) und freies Wirbelsystem beider Propeller für  $J=1,0$  (rechts).

### 3.2. VISKOSE BERECHNUNGEN

Für vertiefende Analysen der untersuchten Konfigurationen und eine Weiterentwicklung der Produkte sowie der Entwurfspraktiken wurden viskose Berechnungen für die ESDs durchgeführt. Im Rahmen einer Parametervariation der Propellernabekappenflüssen konnte die Effizienz erheblich verbessert werden, was auch durch die Modellversuche bestätigt wurde. Die optimierte Variante und die Effizienzverbesserung bei der Variation des Anstellwinkels sind in Abb. 6 dargestellt. Die Parameterstudien wurden dabei für verschiedene signifikante Punkte des Betriebsprofils durchgeführt, die auf dem eingangs beschriebenen Verfahren der statistischen Betriebsprofile basieren. Bei diesen Parametervariationen konnten neue Erkenntnisse für die Auslegung und den Entwurf gewonnen werden, die bei zukünftigen Projekten Anwendung finden werden. Zudem konnte die Vorhersagegenauigkeit der numerischen Verfahren durch die Ergebnisse der Modellversuche überprüft und so auch verbessert werden.

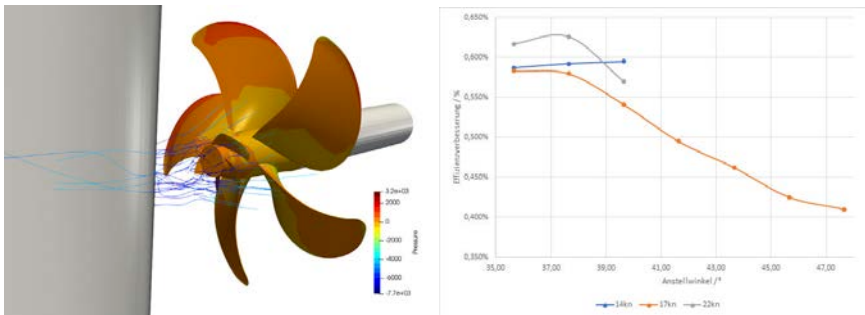


Abb. 6: Visualisierung der nabennahen Strömung für die optimierte Nabenkappenflosse (links) und Darstellung der Effizienzverbesserung bei einer Parametervariation für signifikante Geschwindigkeiten des Betriebsprofils (rechts).

Im Rahmen des Vorhabens wurde ebenfalls eine Nachstromdüse untersucht. Für die Nachstromdüse wurde nach eingänglichen Modellversuchen numerische Optimierungen mittels viskoser Berechnungen durchgeführt (siehe Abb. 7). Im Rahmen des Vorhabens konnten methodische Weiterentwicklungen erzielt und wichtige Erkenntnisse zu der Berechnung und Optimierung gewonnen werden. So zeigt beispielsweise das effektive Nachstromfeld der optimierten Version der Nachstromdüse (Abb. 7 rechts), ein deutlich verbessertes Strömungsfeld im Vergleich zu der Ausgangsversion ohne Düse (Abb. 7 Mitte). Die Erweiterung der methodischen Kompetenz leistet somit einen Beitrag für die künftige Weiterentwicklung und Diversifizierung des Produktportfolios.

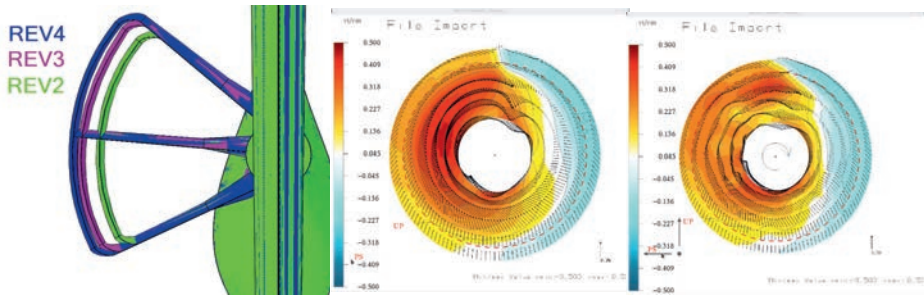


Abb. 7: Untersuchte Varianten der Nachstromdüse (links) und Darstellung des berechneten effektiven tangentialen Nachstromfeldes ohne Düste (Mitte) und mit optimierter Düsengeometrie (rechts).

### 3.3. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Die numerischen Berechnungen wurden durch eine Vielzahl an experimentellen Versuchen gestützt. Für die Untersuchung der Interaktion der an der Propulsion beteiligten Organe besteht jedoch bei der Standardversuchskombination (Freifahrt-, Widerstand und Propulsionsversuch) die Schwierigkeit die auftretenden Effekte aufzuteilen und korrekt den entsprechenden Propulsionsorganen zuzuordnen. Aus diesem Grund wurden zusätzlich Reverse Open Water Versuche durchgeführt, deren Versuchsanordnung schematisch in Abb. 8 dargestellt ist. Durch diese Versuche kann die Propeller-Ruder-Interaktion getrennt von der Rumpffinteraktion betrachtet werden, was im Propulsionsversuch nicht möglich ist. In Kombination der Messungen der einzelnen Kräfte an jedem ESD im Propulsionsversuch ergibt sich dann jedoch ein ganzheitliches Bild.

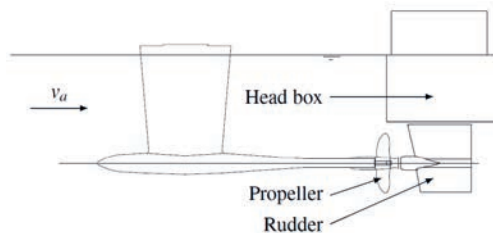


Abb. 8: Schematische Anordnung für den Reverse Open Water Test.

Abb. 9 zeigt den Vergleich der gemessenen und berechneten dimensionslosen Ruderquerkräfte und Schaftmomente über dem Ruderwinkel für den Fortschrittsgrad 0.826 für das in Abb. 2 gezeigte Ruder. Bei den Berechnungen wurde zum einen das zuvor beschriebene hybride potentialtheoretische Berechnungsverfahren aus Abschnitt 3.1 verwendet und zum anderen wurden von dem Projektpartner van der Velden Barkemeyer RANS Rechnungen mit zwei verschiedenen Randbedingungen an der Oberfläche durchgeführt. Für die Ruderquerkräfte liefern alle Verfahren zufriedenstellende Ergebnisse, wobei bei den RANS Verfahren die Druckrandbedingung bessere Ergebnisse liefert als

die Spiegelrandbedingung. Bei der Ruderlängskraft unterschätzt der potentialtheoretische Ansatz erwartungsgemäß die viskosen Reibkräfte. Die RANS Rechnungen erzielen beide eine sehr gute Übereinstimmung mit der Messung. Bei den Schaftmomenten bilden alle Verfahren mit einem gewissen Offset den Verlauf gut ab. Dazu muss bemerkt werden, dass die Schaftmomente wegen der hohen Balancierung sehr gering sind, so dass eine exakte numerische Übereinstimmung schwer zu erreichen ist.

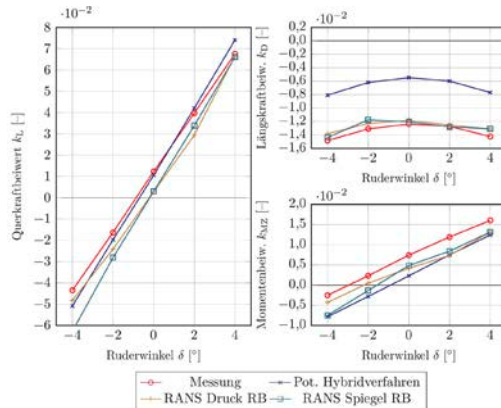


Abb. 9: Vergleich der gemessenen und berechneten Ruderkräfte und Schaftmomente über dem Ruderwinkel für den Fortschrittsgang  $J=0.826$ .

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Vorhaben ESD@SEA ist es erfolgreich gelungen, spezielle Berechnungsmethoden für die Optimierung von propulsionsverbessernden Maßnahmen unter realen Betriebsbedingungen zu ermöglichen. Einerseits konnte die Vorhersage von Langzeit-Betriebsprofilen durch die im Vorhaben getätigten Entwicklungen erheblich verbessert werden. Dadurch, dass das Propulsionsproblem unter realen Umweltlasten hier erstmalig als Manövrierproblem aufgefasst wurde, konnten auch die parasitären Steuerwiderstandskomponenten beim Kurshalten mitberechnet werden. Dieser Umstand hat die Ergebnisqualität erheblich verbessert.

Weiterhin wurde ein neuartiges potentialtheoretisches Berechnungskonzept für Mehrkomponentenpropulsoren entwickelt und validiert, das auf einem hybriden Berechnungsansatz beruht. Dafür wird die exakte Lage der freien Wirbelsysteme mittels eines Traglinien-Verfahrens ermittelt. Hierzu konnte durch eine Neuberechnung der Goldstein-Faktoren erstmalig die analytische Berechnung der induzierten Geschwindigkeiten außerhalb der Propulsorebene realisiert werden. Die Geometrie der freien Wirbelsysteme und die induzierten Geschwindigkeiten können dann Eingang finden in höherwertigere Berechnungsverfahren wie Panel- oder Wirbelgittermethoden. Dadurch wurden jetzt Probleme berechenbar, die vorher nicht oder nur mit aufwändigeren Methoden (wie RANSE) berechenbar waren. Bei den durchgeführten RANS Berechnungen konnte die Berechnungsgenauigkeit gesteigert werden. Des weiteren konnten wichtige Erkenntnisse zu Wechselwirkungen und für die zukünftige Entwurfspraxis gewonnen



werden. Durch die umfangreichen Modellversuche konnten alle Berechnungsverfahren ausreichend validiert werden.

Die entwickelten Methoden eröffnen den Vorhabenpartnern neue Berechnungsmöglichkeiten und damit auch neue potenzielle Geschäftsfelder. Begünstigt wurde die Entwicklung einerseits durch den streng modularen Aufbau der Entwicklungsumgebung des Systems und andererseits dadurch, dass die Partner auch aufgrund der Erfahrung mit anderen BMWI-Projekten effizient und eng verzahnt zusammengearbeitet haben. Die Arbeiten werden nach Ablauf des Vorhabens weiter fortgeschrieben werden, um die entwickelten Methoden und Prozeduren weiter zu ertüchtigen. Die Arbeiten des Vorhabens wurden in sechs Veröffentlichungen auf internationalen Konferenzen oder in Journalen vorgestellt.

### **DANKSAGUNG**

Die Projektpartner danken dem Ministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Verbundvorhabens ESD@SEA sowie dem Projektträger Jülich für die kompetente und stets konstruktive Betreuung des Vorhabens.

Durch die Reederei Hapag-Lloyd AG wurden dem Vorhaben Betriebsdaten eines ihrer Schiffe bereitgestellt. Hierfür möchten wir herzlich danken. Großer Dank gilt zudem dem Unternehmen Neptun Ship Design GmbH für die Bereitstellung von Schiffsinformationen über das Massengutschiff.

## LITERATUR

- [1] Augener, P. H.: Computation of Wave Drift Forces for Dynamic Positioning within the Early Design Stage. Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2016.
- [2] Blendermann, W.: Wind Loading of Ships - Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow. Schriftenreihe Schiffbau. Nr. 574. Hamburg, 1996.
- [3] Büsken, A.; Krüger, S.: A Combined Vortex Lattice Lifting Line Method for Unsteady Propeller Calculations. 40th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, 2021.
- [4] Carstensen, B.: A Method for Rudder Force Calculation in the Design Process Considering Rudder-Propeller-Interaction. Sixth International Symposium on Marine Propulsors smp'19. 2019.
- [5] Carstensen, B.: Calculation of Rudder Forces in the Design Process Using a Panel Method with a Lifting Line Approach for Wake Alignment. In: 14th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS). Yokohama, Japan, 2019.
- [6] Carstensen, B.; Krüger, S.: Coupling of a Boundary Element Method With a Boundary Layer Method for Accurate Rudder Force Calculation Within the Early Design Stage. 40th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, 2021.
- [7] Eljardt, G.: Entwicklung einer statistikbasierten Simulationsmethodik für Schiffsentwürfe unter realistischen Betriebsbedingungen. Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2010.
- [8] Greitsch, L.: Entwicklung eines Entwurfsverfahrens für Schiffsruder auf der Basis statistischer Betriebsprofile. Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2011.
- [9] Haack, T.: Simulation des Manövrierverhaltens von Schiffen unter besonderer Berücksichtigung der Antriebsanlage. Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2006.
- [10] Johannsen, C. Final report of the research project EPROSYS. Techn. Ber., 1662. Hamburgische Schiffbau Versuchsanstalt. Hamburg, 2007.
- [11] Krüger, S.: Computation of the free vortex system of multi component propulsors. Ship Technology Research.Jg. 66, Nr. 1. 2019.
- [12] Krüger, S.: Manövriersimulation auf der Basis von Großausführungsmessungen. Jahrbuch der Schiffbau Technischen Gesellschaft. Nr. 92. S. 541-551, 1998.
- [13] Krüger, S.; Billerbeck, H.; Lübcke A.: Safe Maneuvering in Adverse Weather Conditions. In: Kujala, P., Lu, L. (Hrsg.): 13th International Marine Design Conference (IMDC). Helsinki, Finland. 2018.
- [14] Krüger, S.; Carstensen, B.; Johnsen, L.; Steinbach, C.; Kleinsorge, L.; Richter, H.; Grabert, R.: Statistische Bewertung von Energy Saving Devices in realen Betriebsbedingungen. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. 2020.

- [15] Söding, H.: Limits of potential theory in rudder flow prediction. *Ship Technology Research* 45(3), 1997.
- [16] Söding, H.: Bewertung der Manövriereigenschaften im Entwurfsstadium. *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Band 78 S.179-204, 1984.
- [17] Vorhölter, H.: Numerische Analyse des Nachstroms und der Propellereffektivität am manövrierenden Schiff. Technische Universität Ham



# WASSER –

WARTUNG UND SERVICE VON SCHIFFEN MIT ERWEITERTER REALITÄT

## AUTOREN

<b>DR.ING. AXEL FRIEDEWALD</b>	TU HAMBURG - IPMT, HAMBURG
<b>ROBERT ROST</b>	TU HAMBURG - IPMT, HAMBURG
<b>NIKOLAJ MELUZOV</b>	TU HAMBURG - IPMT, HAMBURG
<b>PROF. DR.-ING. HABIL. HERMANN LÖDDING</b>	TU HAMBURG - IPMT, HAMBURG
<b>TOBIAS KNÖDLER</b>	MAN ENERGY SOLUTIONS SE, AUGSBURG
<b>DR.-ING. JÖRG PESCHKE</b>	MACGREGOR GERMANY GMBH & CO. KG, HAMBURG
<b>TOBIAS DOMBROWSKI</b>	ALFRED KUHSE GMBH, WINSEN/LUHE

## EINLEITUNG

Die Durchführung von Wartungs- und Reparaturarbeiten mit effizienten Prozessen und Werkzeugen ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für maritime Zulieferer und Reeder. Bei der Schiffswartung stehen meist nur kurze Zeitintervalle zur Verfügung, wenn das Schiff zum Be- und Entladen im Hafen liegt. Stehen in diesem engen Zeitfenster nicht alle benötigten Ersatzteile bereit, wird eine weitere Anreise des Servicetechnikers notwendig. Die damit verbundenen Verzögerungen führen zu steigenden Kosten und sinkender Kundenzufriedenheit mit der Dienstleistung. Eine frühzeitige Beurteilung des Defekts ermöglicht es dem Servicetechniker, die Arbeiten im Vorfeld detailliert zu planen und die notwendigen Ersatzteile zu versenden. Darüber hinaus müssen alle relevanten Informationen vor Ort schnell verfügbar sein und anschließend mit geringem Aufwand und strukturiert dokumentiert werden. Dies erhöht die Transparenz für den Kunden und ermöglicht interne Auswertungen zur Verbesserung der Qualitätsregelkreise im Service.

Digitale Assistenzsysteme stellen ein etabliertes Mittel zur Prozessoptimierung in dem beschriebenen Bereich dar. Eine Sonderform der Assistenzsysteme sind Augmented-Reality-basierte Systeme, die in der Forschung sowohl für die Montage [z. B. 1, 2, 3] als auch für die Instandhaltung [z. B. 4, 5] intensiv entwickelt werden. Einen besonderen Stellenwert nimmt in zahlreichen industriellen Anwendungen die Fernunterstützung ein, die unerfahrene Anwender durch den Kontakt mit Experten in der Leitstelle unterstützt, indem sie visuelle Hinweise und Audioanweisungen bei der Durchführung der Wartung nutzt [z.B. 6, 7].

Im Folgenden wird ein umfassenderer End-to-End-Ansatz vorgestellt, der die gesamte Auftragsbearbeitung von der Diagnose bis zur Arbeitsdokumentation durch erfahrene

Servicetechniker unterstützt. Ein ergänzender Anwendungsfall ist die Anleitung von Bordpersonal, durch offline nutzbare Fernwartungsfunktionalitäten, eine integrierte Ersatzteilbestellung und ausführliche Schritt-für-Schritt-Anleitungen mit detaillierten Animationen. Als Hardware kommen dabei vor allem Tablets und Smartphones zum Einsatz, da sie den potenziellen Nutzern vertraut sind und in diesem Fall ein größeres Potenzial bieten als die aktuelle Hands-Free-Hardware. Der Beitrag verdeutlicht neben der vereinfachten Erstellung von Wartungsunterlagen die einzelnen Phasen des Angebots- und Wartungsprozesses am Beispiel verschiedener Schiffskomponenten und stellt die notwendige Systemarchitektur zu deren Unterstützung vor. Anschließend wird die Umsetzung für die einzelnen Phasen erläutert und das wirtschaftliche Potenzial belegt.

## 2. SYSTEM-ARCHITEKTUR

An der Abwicklung eines Instandhaltungsauftrages sind unterschiedliche Akteure auf Kunden- und Dienstleisterseite beteiligt, die entsprechend ihrer Aktivitäten im Gesamtprozess unterschiedlich unterstützt werden müssen. Daraus ergeben sich Anforderungen an die Entwicklung und Gestaltung einer ganzheitlichen Assistenzumgebung, die sich durch präzise Problemlokalisierung und durchgängige Informationsflüsse ohne Medienbrüche auszeichnen sollte.

### 2.1. ANFORDERUNGEN DER INSTANDHALTUNGSaufTRAGSABWICKLUNG

Abbildung 1 zeigt die auftragsunabhängigen und die auftragspezifischen Phasen der Instandhaltung, also die Erstellung der Wartungspläne und die Abwicklung eines Instandhaltungsauftrags.

Ausgelöst wird der Auftrag durch das Auftreten eines Defekts am Instandhaltungsobjekt, zum Beispiel einem Schiffsmotor. Dazu muss der Dienstleister zunächst mit möglichst umfassend dargestellten Symptomen versorgt werden. Soll ein Retrofit am Wartungsobjekt vorgenommen werden, ist eine ähnliche Erfassung des Ist-Zustands erforderlich.

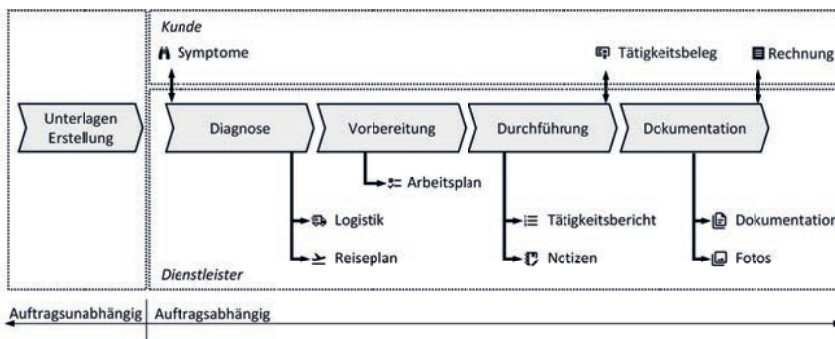


Abb. 1: Bearbeitung eines Instandhaltungsauftrags

Für die Instandhaltung muss dann eine Diagnose durchgeführt werden, damit die Abhilfemaßnahmen richtig bestimmt werden können. Gleichzeitig wird ein Instandhaltungs-

auftrag zur nachgelagerten Bearbeitung und Abrechnung generiert. Im Falle des Retrofits wird ein Angebot einschließlich der Komponentenstückliste erstellt. Die Techniker des Dienstleisters organisieren dann die Teilelogistik und die Reisevorbereitungen. Anhand der Symptomerhebung des Kunden und der Wartungshistorie führt der Servicetechniker den fallspezifischen Arbeitsplan für die Wartungsmaßnahme (bzw. die Retrofitarbeiten) durch und dokumentiert Arbeitszeiten, Arbeitsergebnisse und Besonderheiten.

Darauf aufbauend wird ein Tätigkeitsprotokoll erstellt und vom Kunden als Bestandteil der Auftragsabrechnung und der weiteren Fallbewertung durch den Servicespezialisten bestätigt. Aus zahlreichen Prozessbesprechungen mit Servicetechnikern und Interviews mit Betriebsleitern haben sich folgende Anforderungen an den oben genannten Prozess ergeben:

- › Symptomerfassung: Der weniger erfahrene Bordtechniker benötigt umfangreiche Unterstützung bei der Symptomerfassung durch eine vordefinierte Symptomhierarchie, ggf. mit Beispieltbildern oder -tönen. Darüber hinaus muss es möglich sein, die Symptome zur eindeutigen Identifizierung zu bebildern.
- › Hilfestellung: Reicht diese Unterstützung nicht aus, kann eine Unterstützung des Bordtechnikers in Form einer Fernunterstützung durch Experten des Dienstleisters erforderlich sein. Es werden Navigationsanweisungen und Anleitungen benötigt, z. B. zur Durchführung bestimmter Messungen.
- › Experten-Dialog: Für die Vorbereitung der Wartungsdurchführung ist die ortsspezifische Kenntnis der Symptome hilfreich. In schwierigen Fällen wird die Festlegung von Abhilfemaßnahmen bereits heute über interne Gruppen in den zuständigen Gremien organisiert. Dieser Expertendialog kann durch eine gemeinsame Fallbesprechung mithilfe des 3D-Modells weiter optimiert werden.
- › Anbindung an Ersatzteilkatalog und Wartungshistorie: Die Integration des Assistenzsystems in die entsprechende Unternehmens-IT (insbesondere in den Ersatzteilkatalog und die Wartungshistorie), ist für eine durchgängige Auftragsabwicklung unabdingbar.
- › Automatisierte Dokumentation und Berichtserstellung: Der Aufwand für die Protokollierung von Instandhaltungsarbeiten ist heute geprägt durch handschriftliche Notizen, Fotos und die anschließende zeitaufwändige Erstellung des Berichts. Dies führt gleichzeitig zu hohen Kosten und einem hohen Fehlerpotential bei der Vorbereitung zukünftiger Wartungsmaßnahmen an der gleichen Maschine. Eine Reduzierung des Aufwands muss daher durch Teilautomatisierung und Strukturierung erreicht werden.

## 2.2. PLATTFORM-KOMPONENTEN

Augmented Reality (AR) kann für eine ortsbezogene Darstellung von Arbeitsanweisungen genutzt werden. Dabei wird ein digitales Assistenzsystem eingesetzt, das reale Umgebungen mit virtuellen Inhalten überlagert, wobei ein konstanter Positionsbezug zwischen beiden aufrechterhalten wird und der Benutzer mit diesen virtuellen Inhalten in Echtzeit

interagieren kann [8]. Der Hauptgrund für den Einsatz von Augmented Reality in diesem Kontext ist die Bereitstellung einer intuitiven und hochproduktiven [4] Umgebung für Bordtechniker zur Durchführung von Diagnose Tätigkeiten. Für eine ganzheitliche Prozessunterstützung muss das System jedoch in die Unternehmens-IT integriert werden und hinsichtlich der Benutzerinteraktion für die spezifischen Teilprozesse der Instandhaltung optimiert werden. Dies gilt insbesondere für einen Diagnoseassistenten, die Kommunikation über Kooperationsmodule und eine weitgehende Automatisierung von Reporting und Dokumentation. Das Gesamtsystem (Abbildung 2) für eine durchgängige Instandhaltungsassistenz kann zu diesem Zweck in drei Hauptkomponenten konfiguriert werden [9]:

- › Creator: Ein desktopbasiertes Erstellungssystem zur mühelosen Erstellung von Augmented-Reality-fähigen Wartungsanweisungen. Die Erstellung von textuellen Informationen erfolgt auf Basis von Vorlagen, geometrische Animationen können vom System automatisch, aber auch individuell mit Hilfe eines zusätzlichen Virtual Reality (VR) Moduls erstellt werden [10].
- › Visualizer: Ein Augmented-Reality-basierter Diagnoseassistent für Bordtechniker zur einfachen Erfassung von Symptomen. Darüber hinaus dient er als digitale Service-dokumentation für Servicetechniker zur Information während der Durchführung sowie zur automatischen Dokumentation für die spätere Berichterstattung. Gleichzeitig dient es als Kommunikationstool für die Live-Zusammenarbeit mit einem entfernten Experten.
- › Director: Das Server-Backend für die Speicherung, Bereitstellung und Bearbeitung (insbesondere von kollaborativen Echtzeit-Sitzungen) sowohl von Diagnose- als auch von Wartungsdurchläufen, das als Konnektor zum unternehmensinternen Ersatzteilmanagement, zur Wartungshistorie und zur Geschäftsauftragsabwicklung dient. Es bietet erweiterte Funktionen für die Konvertierung bestehender Dokumente sowie für die Aufbereitung von 3D-Modellen für den Creator und Visualizer (insbesondere VR/AR spezifisch).

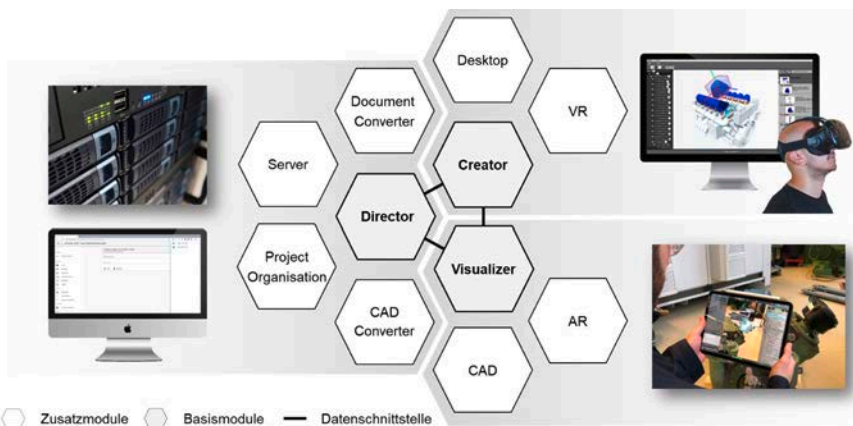


Abb. 2: DIA-Plattform [9]



### 3. AUFTRAGSVORBEREITUNG

#### 3.1. ANGEBOTSERSTELLUNG FÜR RETROFIT

Auch beim Retrofit kann das AR-basierte Assistenzsystem schon vor der Durchführung der Retrofitmaßnahmen unterstützen. Dazu wurde als Szenario die Angebotserstellung eines Schaltanlagen-Retrofits und insbesondere die Planung der notwendigen Verkabelung betrachtet. Dafür wurde eine angepasste Bedienoberfläche für den Servicetechniker geschaffen, der nun mithilfe einer Oberflächenerkennung virtuelle Kabelwege mit dem Tablet erzeugen kann (vgl. Abbildung 3).

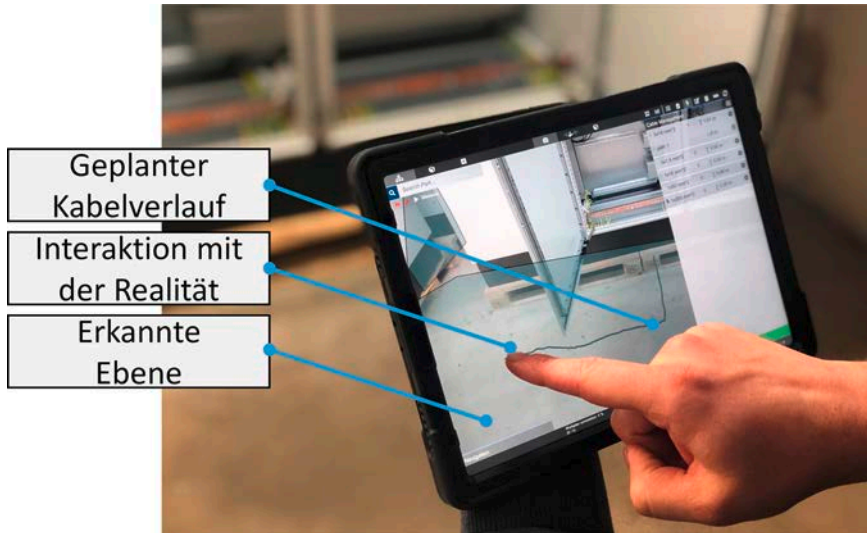


Abb. 3: AR-gestützte Planung von Kabelverläufen

Der Servicetechniker bedient und zeichnet auf der Benutzeroberfläche entweder per Hand oder mit einem herstellereigenen digitalen Stift. Die Anwendung visualisiert den gezeichneten Pfad und errechnet gleichzeitig die Länge. Das ermöglicht später die Kalkulation des Kostenaufwandes für die vorgesehene Kabelmenge. Der Anwender unterscheidet dafür verschiedene hinterlegte Kabelquerschnitte bzw. -typen und die entsprechenden Kostensätze. Die kalkulierten Kosten können im Anschluss direkt an die Arbeitsvorbereitung weitergeleitet oder direkt dem Kunden zur groben Einschätzung präsentiert werden. Damit können herkömmliche Prozesse der Kabelplanung mit manuellen Messwerkzeugen und meist papierbasierter Dokumentation vermieden werden.

Die geplanten Kabelwege werden mit einer Referenz auf den entsprechenden Auftrag abgespeichert und können während des nachfolgenden Retrofitprozesses als Orientierungsunterstützung wieder abgerufen werden – auch virtuell.

### 3.2. ZUSTANDSANALYSE DURCH BORDTECHNIKER

Um dem Servicetechniker bereits im Vorfeld ein möglichst umfassendes und präzises Bild der Wartungsaufgabe zu geben, muss das Bordpersonal in die Lage versetzt werden, das Problem mit größtmöglicher Genauigkeit zu beschreiben. Dazu verweist der Diagnoseassistent direkt auf das entsprechende Bauteil. Klassische Hilfsmittel hierfür sind Fehler- oder Symptomkataloge [11], die als mögliche Bauteilattribute für das Assistenzsystem mit der zugrundeliegenden Geometrie verknüpft und dann im Assistenzsystem über Auswahlmenüs ausgewählt werden können, ggf. angereichert mit Beispielbildern oder typischen Geräuschbeispielen. Darüber hinaus ist es möglich, mit dem Assistenzsystem Fotos oder Tonaufnahmen des jeweiligen Falles zu erstellen, wobei durch das (AR-)Tracking des Systems der genaue Ort der Aufnahmen/Messungen/Fotos dokumentiert wird. Diese Diagnose durch das Bordpersonal kann durch vordefinierte Arbeitsanweisungen unterstützt werden (vgl. Abbildung 4), die das Assistenzsystem im AR-Display anzeigt.

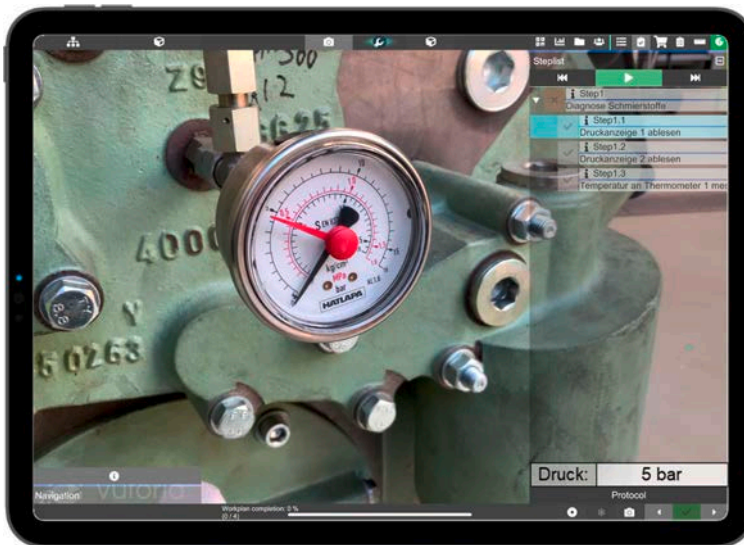


Abb. 4: AR am Kompressor, Ablesen eines Druckes vom Manometer

Reicht diese Form der Unterstützung nicht aus, besteht die Möglichkeit, in den Kooperationsmodus des Assistenzsystems zu wechseln, in dem der Experte die vom Bordpersonal erfassten Informationen auf seinem Terminal sieht und weitere Anweisungen geben kann. Dies können Navigationsanweisungen (z. B. unterstützt durch Richtungspfeile) zum Auffinden bestimmter Messpunkte sein oder weitere ergänzende Handlungsanweisungen, die ad-hoc generiert werden können. Da die Zielgruppe in der Regel mit Smartphones (auch aus dem privaten Bereich) vertraut ist, wurde in Anlehnung an [12] auch ein angepasstes Smartphoneinterface geschaffen, was besonders zur Akzeptanz beiträgt. Dies kann die Symptomerfassung weiter vereinfachen und die Diagnose durch den Experten entsprechend präziser machen.

## 4. MASSNAHMENDURCHFÜHRUNG UND -DOKUMENTATION

### 4.1. SERVICETECHNIKER

Auf Seiten des Servicetechnikers gliedert sich der Instandhaltungsprozess in die drei Phasen Vorbereitung, Durchführung und Dokumentation. Im Folgenden wird die Vorgehensweise für jede Phase beschrieben.

#### VORBEREITUNG

Nach der Erteilung des Wartungsauftrages kann der vom Kunden erstellte Symptombericht (ggf. mit Hilfe eines Exports vom Dienstleister) in der Assistenzsystemumgebung dem Auftrag zugeordnet werden, so dass die Anbindung an die Abrechnungssysteme des Dienstleisters gewährleistet ist. Dies geschieht über die entsprechenden Funktionen des Director-Moduls, das die Schnittstellen zur Finanzbuchhaltung, zum Ersatzteilkatalog und zur Wartungshistorie des defekten Geräts bereitstellt, wo es als zusätzlicher Eintrag oder Fall verwaltet wird. Die Historie umfasst und vereint alle Wartungsereignisse in chronologischer Reihenfolge (beginnend in der Vergangenheit) sowie die detaillierten Wartungsprotokolle, die mit Hilfe des digitalen Assistenzsystems erfasst werden. Die Wartungsaufgaben können dann entweder am PC oder am Tablet vorbereitet werden, da beide Systeme das gleiche Datenformat für die spätere Nutzung auf Tablet oder Smartphone erzeugen. Das Ergebnis ist eine auf den konkreten Fall angepasste Anleitung [13], die aus vorhandenen Vorlagen generiert wird. Möchte sich der Serviceexperte bei schwierigen Diagnosen mit seinen Kollegen absprechen, wird dies ebenfalls durch den Kollaborationsmodus des Systems unterstützt, da der gesamte Informationsumfang des Assistenzsystems den Kollegen dann sofort zur Verfügung steht und nicht erst aufwändig in eine Messenger-Gruppe gepostet werden muss. Dabei kann sowohl die direkte Kommunikation als auch die zeitverzögerte Kommentierung genutzt werden.

#### AUSFÜHRUNG

Die Durchführung von Instandhaltungsarbeiten ist in der Regel durch die Nutzung der CAD-Ansicht des Assistenzsystems sowie der ergänzenden fallspezifischen Textinformationen wie z. B. von der Norm abweichende Anzugsdrehmomente einzelner Schrauben gekennzeichnet (vgl. Abbildung. 5).

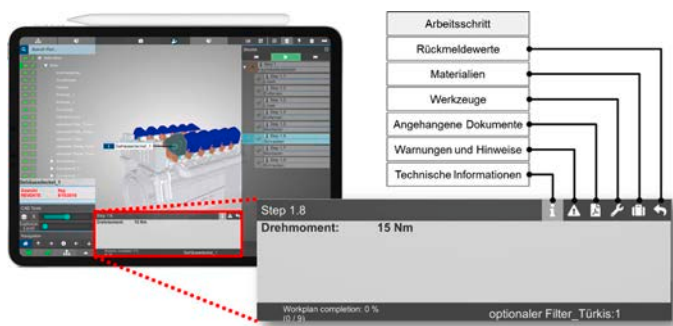


Abb. 5: Benutzeroberfläche des Visualizers für Servicetechniker [14]

Der Grund liegt in der grundsätzlichen Vertrautheit des Servicetechnikers mit der Materie, wie die Beobachtung zahlreicher Anwendungsfälle gezeigt hat. Die Quittierung der einzelnen Arbeitsschritte (und die Aufzeichnung von Rückmeldewerten während der Wartung) erleichtert zudem die Dokumentation der durchgeführten Arbeiten. Ergänzende Fotos werden vom Assistenzsystem aufgenommen (auch hier an der richtigen Stelle) und automatisch dem Arbeitsschritt zugeordnet

## DOKUMENTATION

Bei der Auswahl eines Arbeitsschrittes (vgl. Abbildung. 6) erfolgt die Erfassung der Startzeit und bei der Fertigmeldung wird die Gesamtdauer festgehalten. Dieser Protokollbericht hilft bei der Nachkalkulation des Zeitaufwandes für die Arbeit sowie bei der Optimierung der internen Kostenkalkulation. Gleichzeitig werden über die Arbeitsschritt-erfassung auch der Umfang und die Art der Tätigkeiten erfasst. Werden zu einem Arbeitsschritt Verbrauchsmaterialien oder Ersatzteile verwendet, werden diese mit der Rückmeldung eines Arbeitsschrittes mitgebucht und im Sitzungsprotokoll zur späteren Abrechnung aufgeführt.

The screenshot shows a digital maintenance report for 'Exchange of Gas Valve' dated 10/09/2020 at 09:39:20. The interface includes a timeline on the left with a photo of a gas valve labeled 'mm\_1.1'. The main part of the screen displays a table of actions performed during the task.

TIME	DESCRIPTION	PART	ACTION
09:40:10	120d_schrauben_Kupplungsstellbohrloch_1		disassembly
09:40:40	09V 712 - versetzt durch 09V EN 102 470/ M12 x 30,3		disassembly
09:40:40	09V 712 - versetzt durch 09V EN 102 470/ M12 x 30,4		disassembly
09:40:40	09V 90 312 x 18,5		disassembly
09:40:40	09V 90 312 x 18,4		disassembly
09:40:51	70d_schrauben_KupplungsL_1		disassembly
09:40:14	120d_schrauben_Kupplungsbohrloch_1		check
09:40:21	120d_schrauben_Kupplungsbohrloch_1		assembly

At the bottom of the table, there is an 'ACTIVITY REPORT' button.

Abb. 6. Automatischer Wartungsbericht

Bei der bisherigen Berichtserstellung ist sowohl die Formulierung von handschriftlichen Notizen als auch die Benennung und Zuordnung von Fotos sehr zeitaufwändig. Um diesen hohen Aufwand einer manuellen Berichtserstellung zu vermeiden, wurde das Assistenzsystem um eine automatische Berichtsfunktion erweitert. Die weiter oben beschriebenen Einträge werden automatisch in einem digitalen Wartungsprotokoll zusammengefasst (vgl. Abbildung 6). Dazu gehören alle durchgeführten Arbeiten, die verwendeten Werkzeuge und die dazugehörigen Fotos oder Tonaufnahmen. Dieser Datensatz kann dann je nach Verwendungszweck formatiert und weitergeleitet werden.

## 4.2. ROUTINEWARTUNG DURCH BORDTECHNIKER

Einfachere Wartungstätigkeiten können auch durch Bordtechniker durchgeführt werden, wenn sie mit dem Assistenzsystem angeleitet werden. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Quittierung von Warnhinweisen gelegt sowie auf die Animation von

Demontageabläufen (siehe auch Abbildung 7) und das Einblenden der notwendigen Werkzeuge, um die Arbeiten auszuführen. Dazu werden die situationsgerecht notwendigen Informationen angezeigt und zur Unterstützung kann auch hier der Kooperationsmodus des Assistenzsystems zugeschaltet werden, der eine Fernunterstützung ermöglicht.



Abb. 7. Quittieren von Warnhinweisen

## 5. ERSTELLUNG DER WARTUNGSUNTERLAGEN

Damit nicht nur bei der Durchführung der Wartung und Instandhaltung wirtschaftliche Verbesserungen durch den Einsatz von Augmented Reality erzielt, sondern bereits bei der Erstellung der Instandhaltungsanleitungen Einsparungen und Arbeitserleichterungen erreicht werden, wurde eine auf die Belange von digitalen (und mitunter auch animierten) Anleitungen ausgerichtete Systemkomponente, der bereits genannte Creator, entwickelt.

Zu Beginn des Erstellungsprozesses lädt der Anwender entweder eine bereits existierende, AR-fähige Anleitung als Vorlage, importiert eine klassische (z. B. xml, html oder dox basierte) Anleitung oder erzeugt eine vollständig neue (vgl. Abbildung 8). Mit Beginn der Erstellung wählt der Anwender zudem das Produkt bzw. die Produktvariante aus, wobei der Creator automatisch die dafür hinterlegten CAD-Modelle vom Director bezieht und anzeigt (vgl. Abbildung 9).

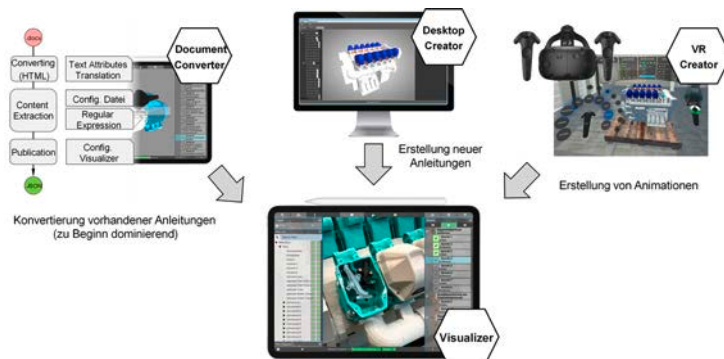


Abb. 8: Erstellung von Instandhaltungsanleitungen für das digitale Assistenzsystem

In der dreigeteilten Anzeige erhält der Anwender einen Überblick über die Produktstruktur (links), das 3D-Modell (mittig) sowie die Schrittliste (rechts). Bei der Bearbeitung eines Schrittes hat er die Möglichkeit einen Titel sowie eine Kurzbeschreibung anzugeben, sowie Zusatzhinweise (Warnmeldungen, Hinweise), Werkzeuge und Materialien zu ergänzen. Ferner kann über Produktstruktur oder 3D-Bereich ein konkretes Bauteil ausgewählt und mit dem Schritt verknüpft werden. Einfache Animationen können ebenfalls direkt über die 3D-Ansicht ergänzt werden wobei sich die Erstellung komplexer Animationen als schwierig bzw. aufwändig erweist. Zu diesem Zweck wurde ergänzend eine VR-Ansicht des Creators entwickelt (vgl. Abbildung 9, rechts).

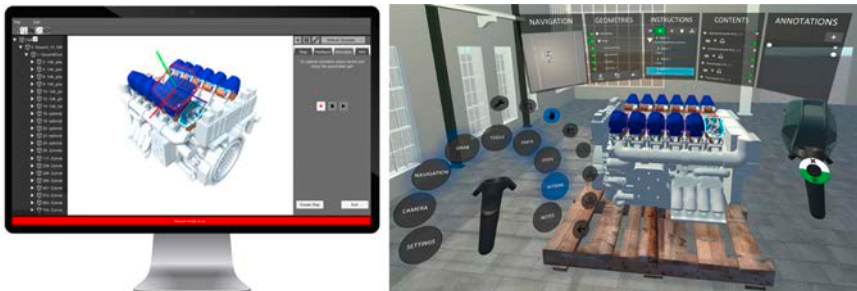


Abb. 9: Erstellung von Instandhaltungsanleitungen am Desktop sowie in VR

Der Anwender kann eine bestehende Anleitung sowie das dazugehörige 3D-Modell direkt vom Director laden und die am Desktop begonnene Bearbeitung nahtlos in der virtuellen Realität fortsetzen. Die brillenbasierte Lösung setzt hierbei auf die Verwendung handgeführter Controller mit welchen durch einfache, händische Bewegungen, sehr komplexe Animationspfade aufgezeichnet und einem konkreten Schritt beigelegt werden können.

Durch den Ansatz können insbesondere die zeitintensiven Tätigkeiten zur Erstellung von Illustrationen sowie das Layouting entfallen. Ferner ist es möglich Schrittbeschreibungen weitaus kürzer zu fassen, da ergänzende Animationen und Zusatzinformationen einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der durchzuführenden Tätigkeit liefern. Die kombinierte (Desktop + VR) Erstellung bietet weiter den Vorteil, aufgabenspezifisch besonders effiziente sowie ergonomische Eingabegeräte in den Erstellungsprozess einzubinden.

## 6. WIRTSCHAFTLICHKEIT UND AKZEPTANZ

Der Nutzen des Einsatzes von Assistenzsystemen wurde bei mehreren maritimen Komponentenherstellern, die auch Serviceleistungen erbringen, hinsichtlich ihrer Produktivitätssteigerung und Nutzerakzeptanz eingehend untersucht. Exemplarisch wurden bei MAN Energy Solutions Einsparpotenziale bei der Erstellung von Arbeitsanweisungen von 51% [5] festgestellt. Der Test fand in einer Laborumgebung statt, in der die Probanden die gleichen Wartungsanweisungen mit einem konventionellen System und der DIA-Creator-Lösung erstellen mussten. Für die Bewertung der Einsparungen bei den Instandhaltungs-

aufträgen wurde die Visualizer-Lösung testweise bei einem zweitägigen Instandhaltungsauftrag an Schaltschränken eingesetzt (vgl. Abbildung 10). Um die Produktivitätssteigerung zu ermitteln, wurde der Arbeitsprozess aufgezeichnet und daraus die Verteilung der Arbeitszeit auf die verschiedenen Phasen der Auftragsbearbeitung bestimmt. Anschließend schätzten die Key-User die Einsparungen pro Phase. Insbesondere in den Phasen Zustandsanalyse (50%), Funktionskontrolle (20%) und Auftragsdokumentation (40%) konnte auf diese Weise ein hohes Produktivitätssteigerungspotenzial nachgewiesen werden. Ergänzende Experteninterviews im Bereich der Motoreninstandhaltung haben sogar gezeigt, dass die Dokumentationsphase um bis zu 80% verkürzt werden konnte.

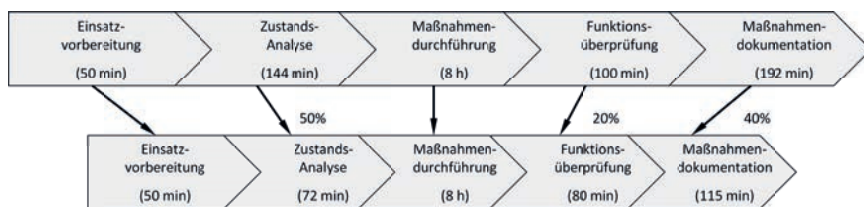


Abb. 10. Wirtschaftlichkeit, in Anlehnung an [14]

Darüber hinaus wurde eine zweite Evaluierung der Visualisierungskomponente zusammen mit Servicetechnikern aus der Motoreninstandsetzung durchgeführt, die einen Austausch eines Gasventils vornahmen. Dabei wurde die Zeit für die Durchführung sowohl mit Hilfe herkömmlicher Papierunterlagen als auch mit dem Visualizer gemessen. Es hat sich gezeigt, dass der Zeitanteil, der für informationsbezogene Tätigkeiten aufgewendet wurde, um 35% reduziert werden konnte [14].

Da Rentabilität und Kundenzufriedenheit für den Anlagenbetreiber direkt von der genauen Symptomerfassung abhängen, ist die Akzeptanz einer Tablet oder Smartphone-Applikation (immer griffbereit) für das (Bord-)Personal entscheidend, was in einer anderen Umfrage positiv bewertet wurde [15].

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Forschungsprojekt „Wartung und Service von Schiffen mit erweiterter Realität (WASSER)“ hatte zum Ziel, die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Wartungsinformationen für Servicetechniker, Bordbesatzung und Montagefachkräfte zu erhöhen. Dazu sollten die mehrfach nachgewiesenen Vorteile der erweiterten Realität genutzt werden. Auf der Grundlage zahlreicher Szenarien der beteiligten Unternehmen wurde ein modulares Augmented-Reality-System entwickelt, welches bereits bei der Erstellung oder Konvertierung der Wartungsunterlagen Unterstützung bietet und den Instandhaltungs- oder Retrofitprozess durch spezifische Hilfen im Frontend und bei der Dokumentation erleichtert. Eine Server-Komponente stellt den reibungslosen und sicheren Austausch sämtlicher Daten zwischen den einzelnen Geräten sicher und bindet das Gesamtsystem an die Wartungshistorie, das Ersatzteilwesen und das Auftragsmanagement an. Der Projekterfolg konnte durch zahlreiche Evaluationen und Anwenderbefragungen nachgewiesen werden.

## DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt „Wartung und Service von Schiffen mit erweiterter Realität (WASSER)“ wurde gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags.

## LITERATUR

- [1] Bottani, E., Vignali, G.: Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IJSE Transactions* 51 (3), S. 284–310 (2019)
- [2] Halata, P.-S.: Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion, Dissertation, TU Hamburg 2018
- [3] Friedewald, A., Halata, P.S., Meluzov, N., Lödding, H. : Die Produktivitätswirkung von Augmented Reality in der Unikatfertigung. In: Schlick, C. M. (Hrsg.): *Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation*, S. 141-162, GITO, Berlin (2016)
- [4] Petersen, P.: Enhancing the Quality and Reliability of Maintenance Operations using Mixed Reality. In: Bertram, V. (Hrsg.): *19th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '20)*, Proceedings, Pontignano 2020, S. 38-47
- [5] Meluzov, N.; Friedewald, A.; Mundt, C.; Lödding, H.: Produktivitätssteigerung in der Instandhaltung durch digitale Assistenzsysteme. In: Biedermann, H. (Hrsg.): *Digitalisierte Instandhaltung. Stand und Perspektiven*. 33. Instandhaltungsforum (Hrsg.. ÖVIA) Proceedings, TÜV-Verlag, Köln 2019, S. 181-197
- [6] PTC Announces Vuforia Chalk App for Augmented Reality Communications. <https://www.ptc.com/en/news/2017/vuforiachalk>, last retrieved 07.04.2021
- [7] Features Made for a Complete New Way of Remote Collaboration. <https://oculavis.de/en/product/features/>, last retrieved 07.04.2021
- [8] Azuma, R.T.: A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6(4), S. 355–385 (1997)
- [9] Meluzov, N.; Friedewald, A.; Elzalabany, A.; Lödding, H.: Aufwandsarme Erstellung von Augmented-Reality-Anleitungen für die maritime Instandhaltung. In: Lukas, U. v. et al. (Hrsg.): *Go-3D 2019 "Mit 3D Richtung Maritim 4.0"*. Proceedings, Rostock 2019, S. 31-44
- [10] Meluzov, N.; Friedewald, A.: Modular Authoring of Augmented Reality Based Service Instructions. In: Bertram, V. (Hrsg.): *17th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '18)*. Proceedings, Pavone 2018, S. 176-188
- [11] Plog, J.: Expertensystemunterstützte Qualitätssicherung bei der Fertigung von Elastomerteilen, Dissertation, TU Hamburg-Harburg 1989



- [12] Jahn, N.; Friedewald, A.; Lödding, H.: Using the Smartphone as an Augmented Reality Device in ETO Industry. In: Lalic, B.; Majstorovic, V.; Marjanovic, U.; Cieminski, G. v.; Romero, D. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems: Towards Smart and Digital Manufacturing: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2020, Novi Sad, Proceedings, Part II*. Springer International Publishing, Cham 2020, S. 538–546
- [13] Friedewald, A.; Meluzov, N.; Rost, R.: Potentials of Augmented Reality in Aircraft Assembly and MRO. In: Estorff, O. v.; Thielecke, F. (Hrsg.): *6th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2017)*. Proceedings, Shaker, Aachen 2017, S. 295-306
- [14] Meluzov, N.; Rost, R.; Friedewald, A.: Holistic Maintenance Support with a Digital Assistance System, in: Bertram, V. (Hrsg.): *19th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '20)*, Proceedings, Pavone 2020, S. 48-62
- [15] Lödding, H.; Friedewald, A.; Meluzov, N.; Rost, R.: *Wartung und Service von Schiffen mit erweiterter Realität (WASSER) – Grundlagen (GRUND)*. Abschlussbericht TU Hamburg 2021



# querEVA –

BEDARFSGERECHTE QUERSTRAHLANLAGEN –

ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINER AUSLEGUNGSMETHODIK

## AUTOREN

<b>LARS KOOPMANN</b>	JASTRAM GMBH & CO. KG, HAMBURG
<b>MAXIM BRADE</b>	JASTRAM GMBH & CO. KG, HAMBURG
<b>JOHANNES MERSMANN</b>	PROMARIN PROPELLER- UND MARINETECHNIK GMBH
<b>BARBARA BLUM</b>	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
<b>JÖRN HINNENTHAL</b>	JASTRAM GMBH & CO. KG, HAMBURG
<b>YANNICK EBERHARD</b>	PROMARIN- PROPELLER- UND MARINETECHNIK GMBH, ERFSTADT
<b>ANDRÉS CURA HOCHBAUM</b>	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN
<b>JOHANNES SCHWARZ-BEUTEL</b>	TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

## MOTIVATION

Querstrahlanlagen (QSA) werden für das Manövrieren von Schiffen oder schwimmenden Strukturen eingesetzt, wenn die Steuerwirkung durch das Ruder und eine Schubrichtungserzeugung durch den Hauptantrieb nicht mehr ausreichend sind. QSA werden heute als Bug- und Heckstrahler eingesetzt, laufen im Dauerbetrieb bei der Positionierung von Versorgungern vor einer Offshore-Plattform oder beim „Electronic Anchoring“ von Megayachten, wenn diese in geschützten Seegebieten liegen, wo Anker und Ankerketten die Lebensräume unter Wasser zerstören würden. Durch das mittlerweile stark erweiterte Einsatzspektrum gewinnen die Energieeffizienz sowie die Vermeidung von Schall und Vibration an Bedeutung.

Neben Hauptmaschine und Propeller sind QSA einer der großen Erzeuger von Schall und Vibration im Schiff. Verbindliche Schallemissionsverordnungen wie die IMO Resolution MSC.337(91) [1] setzen heute hohe Standards zum Schutz der Besatzung vor einer Belastung durch Lärm. Von Klassifikationsgesellschaften wurden in den letzten Jahren sogenannte „Comfort Class Rules“ eingeführt, z. B. [2] und [3]. Angelehnt an diese Regeln für besonders leise Schiffe sind in vielen Bauverträgen verbindliche Grenzwerte für Schall und Vibrationen im Schiff festgeschrieben. Neben dem Schalleintrag in das Schiff gewinnt aber auch die Belastung der maritimen Umwelt durch Schiffsgeräusche zunehmend an Beachtung [4, 5].

Das Projekt querEVA zielte auf die Verbesserung der Methodik zur Auslegung von Querstrahlanlagen unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen [6], des Propellerdesigns

[7] und der Fahrzustände des Schiffes [8]. Die Entwicklungsarbeiten basierten einerseits auf Großausführungsmessungen an einer QSA unter Laborbedingungen und andererseits auf numerischen Full-Scale-Strömungssimulationen.

Projektpartner waren neben der Jastram GmbH & Co. KG als Hersteller maßgeschneiderter Lösungen im Bereich Manövrier- und Antriebstechnik die Promarin Propeller- und Marine-technik GmbH als erfahrener Propellerhersteller mit innovativen Ansätzen für kavitations- und vibrationsgeminderte Propeller sowie die TU Berlin mit dem Fachgebiet Dynamik Maritimer Systeme als Spezialist für Manövrieren und numerische Strömungssimulation.

## **2. JASTRAM – SIMULATION UND GROSSAUSFÜHRUNGSMESSUNG (QUERSIGAMUT2)**

### **2.1. MESSDATENERFASSUNG AN EINER GROSSAUSFÜHRUNG**

Im Rahmen von querSIGAMUT2 wurde ein Versuchsaufbau für Messungen an einer Querstrahlanlage im Maßstab 1:1 in der Tiefwasserrinne der TU Berlin entwickelt und für umfangreiche Geometrie- und Betriebsparameterstudien eingesetzt. Damit sich am Querstrahler eine realistische Strömung einstellen konnte, wurde dieser in eine generische Vorschiffssektion integriert. Diese ist modular aufgebaut und ermöglichte so die Untersuchung verschiedener Einbausituationen. Die Vorschiffssektion mit Querstrahler wurde unter dem Schleppwagen der Tiefwasserrinne mit dem Tunnel längs zur Rinne aufgehängt. Abb. 1 zeigt den Versuchsaufbau für die Großausführungsmessungen und fasst die Hauptdaten des Versuchsaufbaus zusammen.

Neben der Messung von Kräften und Drücken ermöglichte der Versuchsaufbau dank seiner Anlehnung an die Stahlstruktur eines Schiffes auch die Erfassung des Körperschalls. Eine Hochgeschwindigkeitskamera vor dem Propeller lieferte erstklassige Aufnahmen des instationären Kavitationsverhaltens am QSA-Propeller. Ein von der TU Berlin gebauter Messrechen mit Prandtlsonden erlaubte die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnel der QSA. Durch die Untersuchungen im Maßstab 1:1 sind die Messungen uneingeschränkt aussagekräftig hinsichtlich der Kräfte, Kavitations- und Geräuschentwicklung und unterliegen nicht den sonst üblichen Maßstabeffekten durch eine Überzeichnung viskoser Effekte im Modell.

Dank der großen Anzahl von Messgrößen, einer sehr guten Messdatenqualität sowie der Vielzahl untersuchter Konfigurationen konnte eine ausgezeichnete Validierungsgrundlage für die numerischen Strömungssimulationen (CFD, Computational Fluid Dynamics) geschaffen werden. In querEVA wurden innerhalb von eineinhalb Jahren über 700 Messungen mit dem beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt.

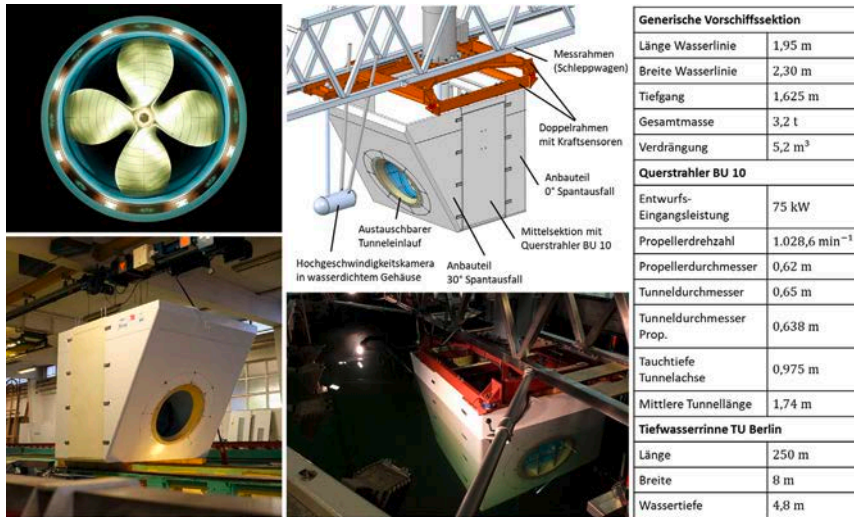


Abb. 1: Versuchsaufbau mit Hauptdaten

## 2.2 Definition des Vertrauensbereichs von numerischen Strömungssimulationen

Die CFD-Berechnungen von Jastram wurden mit Ansys CFX im Maßstab 1:1 durchgeführt. Die Ergebnisse konnten somit direkt anhand der experimentellen Daten validiert werden. Neben der Netzunabhängigkeitsstudie wurden weitere numerische und geometrische Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Der Propellerspitzenspalt und Propellerabenspalt wurden detailliert vernetzt und deren Einfluss quantifiziert. Ferner wurden Untersuchungen zur Zeitschrittweite, zum Turbulenzmodell und zur Vernetzungssoftware angestellt. Das Ergebnis dieser Studien ist ein qualitativ hochwertiges und validiertes Setup für belastbare CFD-Ergebnisse. Die Berechnungen wurden im Folgenden transient auf einem Rechengitter mit 15 Mio. Zellen und dem k- $\omega$ -SST-Turbulenzmodell durchgeführt.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen einen Vergleich von Messwerten mit CFD-Ergebnissen der drei Projektpartner. In Abb. 2 sind die Ergebnisse für die Gesamtkraft in Tunnel-längsrichtung  $F_y$  und den Propellerschub  $T_p$  über der Propellerdrehzahl  $n_p$  dargestellt. Im linken Schaubild saugt der Propeller über die freie Seite mit 30° Spantausfall und konischem Tunneleinlauf und im rechten über das Getriebe bei senkrechter Bordwand (0° Spantausfall). Die von Promarin eingesetzte Kombination aus OpenFOAM-Löser mit dem Vernetzer cfMesh zeigt für die Gesamtkraft etwas größere Abweichungen von den Messwerten. Der hauseigene Löser NEPTUNO [9] der TU Berlin mit dem Vernetzer GridPro erzielt beim Saugen über die freie Seite sehr gute Werte. Die Jastram-Berechnungen mit dem kommerziellen Paket Ansys CFX stimmen vor allem beim Ansaugen über das Getriebe hervorragend mit den Messergebnissen überein. In Abb. 3 sind die Propellerdrehmomente  $Q_p$  für beide Arbeitsrichtungen vergleichend dargestellt. Hier zeigen die Löser NEPTUNO und CFX praktisch die gleichen Ergebnisse und

unterschätzen die gemessenen Werte. Die OpenFOAM-Berechnungen liegen hier hingegen näher an den Messwerten.

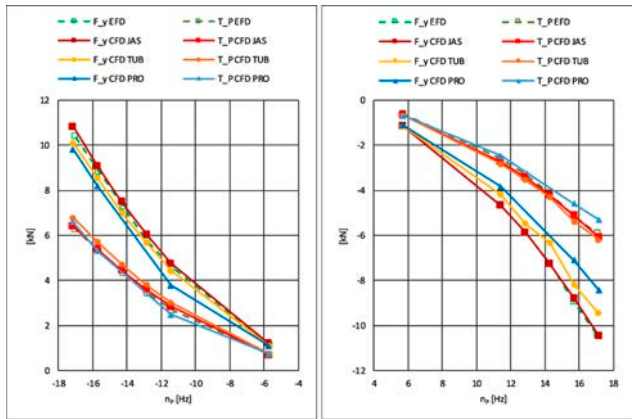


Abb. 2: Vergleich der in querEVA eingesetzten CFD-Codes mit den Messwerten – Gesamtkraft  $F_y$  und Propellerschub  $T_p$  für das Saugen über die freie Seite (links) und über das Getriebe (rechts), jeweils mit konischen Tunneleinläufen

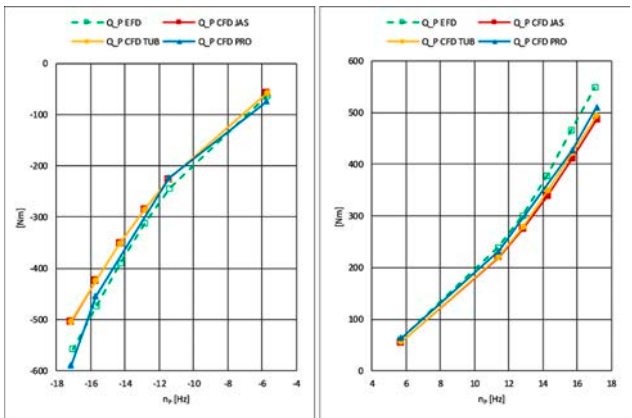


Abb. 3: Vergleich der in querEVA eingesetzten CFD-Codes mit den Messwerten – Drehmomente  $Q_p$  für das Saugen über die freie Seite (links) und über das Getriebe (rechts), jeweils mit konischen Tunneleinläufen

### 2.3 Anlagenoptimierung

QSA können extremen dynamischen Lasten unterliegen, die aus den hydrodynamischen Betriebsbedingungen folgen und zu einer hohen Vibrations- und Geräuschanregung führen [10]. Im unteren Frequenzbereich (bis ca. 200 Hz) resultieren diese maßgeblich aus einer inhomogenen, instationären Zuströmung zum Propeller. Wenn der Propeller z. B. über die freie Seite saugt, kann durch die starke Umlenkung der Strömung bedingt durch Spantausfall oder stumpfe Wasserlinienwinkel ein Wirbelgebiet am Tunneleinlauf resultieren, vgl. Abb. 4 links. Höherfrequente Lasten werden durch Kavitation verursacht, welche bei einer hohen Schubbelastung des Propellers nicht zu vermeiden ist, vgl. Abb. 4 rechts.

Ziel der Anlagenoptimierung war die Reduzierung der dynamischen Lasten unter Beibehaltung einer hohen Schubaussbeute. Ansätze betrafen die Zustromoptimierung und das Propellerdesign (siehe Abschnitt 3). Durch ein angepasstes Anlagendesign kann das Geräusch- und Vibrationsniveau erheblich reduziert werden, vgl. Abb. 5. Im günstigsten Fall ist die QSA in einem Bereich mit möglichst senkrechter Spantkontur und kleinen Wasserlinienwinkeln untergebracht und der Tunneleinlauf als großzügige Rundung ausgestaltet. Die Integration eines Querstrahlers in den Gesamtentwurf des Schiffes unterliegt aber meist großen Kompromissen. Sind die Einbaubedingungen nicht weiter optimierbar, kann beispielsweise durch ein spezielles silentGrid®-Schutzgitter von Jastram eine Schall- und Vibrationsminderung erzielt werden.

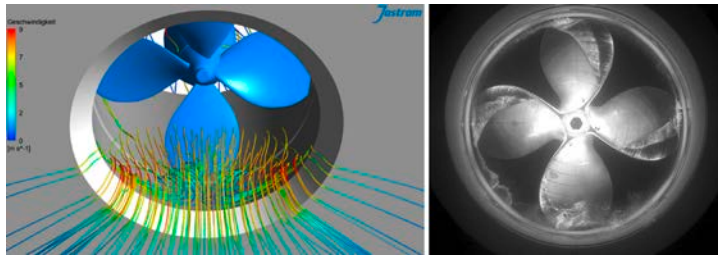


Abb. 4: Wirbelgebiet am Tunneleinlauf beim Saugen über die freie Seite bei 30° Spantausfall (links) – die stabile Schichtkavitation löst beim Durchlauf der Blätter durch das Gebiet der gestörten Zuströmung im unteren Tunnelbereich ab und reißt auf (rechts)

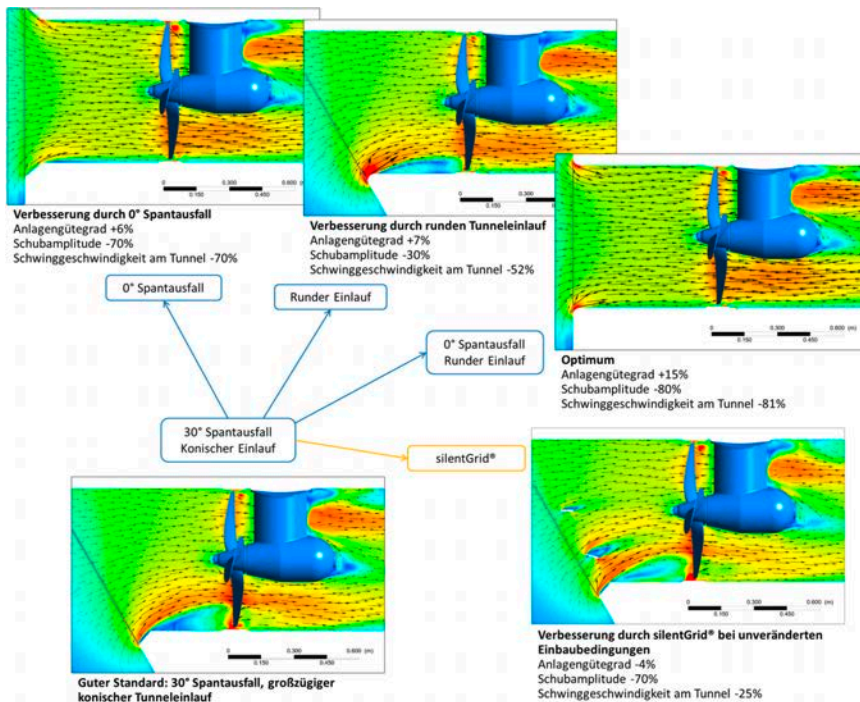


Abb. 5: Einfluss von Tunneleinlauf, Spantausfall sowie silentGrid® auf den Anlagengütegrad, die Schubamplitude (in der Blattpassierfrequenz) und die Schwinggeschwindigkeit (Frequenzbereich 25 bis 4.000 Hz)

## 2.4 Kompetenzentwicklung und Verwertung

Jastram unterstützt schon während der frühen Entwurfsphase eines Schiffes Betreiber, Designer und Werften beim Bau von leisen und effizienten Schiffen. Insbesondere dann, wenn Geräuschanforderungen spezifiziert sind und bereits im Entwurf Schallprognosen zur Erfüllung dieser Spezifikation notwendig werden, sind umfassendes Wissen über den Schalleintrag und mögliche Methoden zur Schallreduzierung erforderlich. Hierbei liefern die Erkenntnisse und Ergebnisse aus querSIGAMUT2 einen signifikanten Beitrag. Die durchgeführten Großausführungsmessungen ergaben eine Datenbasis, mit der die Prognosesicherheit des Schall- und Vibrationsniveaus verbessert wurde. Durch die oben genannten numerischen Detailanalysen konnte ein validiertes und robustes CFD-Setup erarbeitet werden, welches auch im Ingenieursalltag bei der Projektierung neuer, leiser QSA effektiv eingesetzt werden kann.

Bei bestehenden QSA ist eine Geräuschminderung als Retrofit möglich. Jastram erarbeitet unter Bewertung der akustischen Gegebenheiten gemeinsam mit dem Kunden eine Strategie, die einzelne oder eine Gruppe von Aspekten der Schallminderung in den Fokus nimmt. Zur Analyse der akustischen Ausgangssituation werden die Schwingbeschleunigungen an der QSA bei Bordmessungen aufgenommen. Die grundlegenden Kompetenzen und Verfahren hierzu wurden in querSIGAMUT2 erarbeitet. Je nach Anforderung an die Geräuscharmheit stehen unterschiedliche Maßnahmen zur Geräuschreduzierung zur Verfügung. Die Maßnahmenauswahl erfolgt unter Berücksichtigung von Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit.

## 3. PROMARIN – ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR AUSLEGUNG MODERNER PROPELLERDESIGNS (MEMOPROP)

Das Teilprojekt MemoProp setzte den Fokus auf die Auslegung, Herstellung und Weiterentwicklung der im Verbundprojekt querEVA eingesetzten Propeller. Zunächst sollte ein nach Stand der Technik ausgelegter QSA-Propeller mit vier Flügeln (Bezeichnung B4) produziert werden. Dieser Referenzpropeller wurde mit optischen und taktilen Verfahren geometrisch erfasst. Anschließend wurde die geometrisch eindeutig bestimmte Geometrie numerisch und experimentell im Verbundprojekt untersucht. Das Ziel von MemoProp war die Weiterentwicklung des B4 zu einem hinsichtlich Effizienz- und Geräuschemission optimierten Design. Dies beinhaltete im ersten Schritt eine Parametrisierung der Einbausituation. Anschließend wurde deren Einfluss auf die Propellercharakteristik untersucht. Aus diesen Untersuchungen resultierte ein Parameterraum, der die Arbeitsumgebung des Propellers beschreibt. Im nächsten Schritt wurde eine systematische Propellergeometrievariation unter Berücksichtigung der Einbausituation durchgeführt. Da ein Propellerentwurf immer ein Zielkonflikt darstellt, wurden Korrelationen zwischen Propellergeometrie und Einbausituation gesucht. Durch diese Verknüpfung kann zuverlässig das Propellerdesign auf Geometrieänderungen hinsichtlich der Einbausituation angepasst werden.



### 3.1 Variation der Propellergeometrie

Im Projektzeitraum wurden sechs verschiedene Propeller gebaut und untersucht. Ziel war es, den Einfluss der Propellergeometrie auf die Propellerperformance zu ermitteln. Die Basis bildete der Referenzpropeller B4. Dieses Design entspricht dem Stand der Technik für Querstrahlpropeller. Beim zweiten Propeller (B6) wurde die Flügelzahl von vier auf sechs erhöht. In der nächsten Evolutionsstufe wurde das Propellerdesign mit einer Vorzugsrichtung ausgelegt (S6). Durch Aufprägen von Flügelrücklage (Skew) wird der Propeller für eine Drehrichtung optimiert. Im letzten Teil des Projekts wurden zwei Propeller mit unregelmäßiger Skew-Verteilung gebaut. Diese sogenannten Multipulsion® Propeller zeichnen sich durch unregelmäßige Abstände zwischen den Flügelspitzen aus. Hierdurch soll eine harmonische Anregung der umgebenden Struktur vermieden werden. In Abb. 6 ist der Skew-Propeller S6 dem Multipulsion-Propeller M6.1 gegenübergestellt. Eine ausführliche Erklärung dieses Konzeptes ist auf [www.multipulsion.com](http://www.multipulsion.com) zu finden.

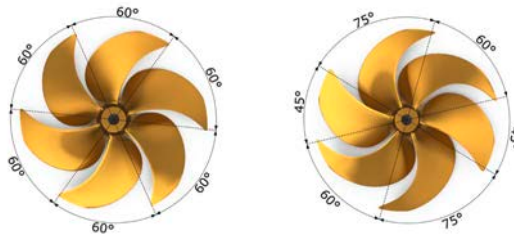


Abb. 6: Vergleich zwischen einem Propeller mit gleichem Skew-Winkel für alle Flügel (hier am Bsp. Propeller S6, links) und dem Multipulsion®-Design mit unregelmäßiger Verteilung (hier am Bsp. M6.1, rechts)

Der Propeller M6.1 hat seine Vorzugsrichtung beim Saugen über das Getriebe der QSA und Propeller M6.2 hat seine Vorzugsrichtung beim Saugen über die freie Seite. In Abb. 7 sind die verschiedenen Propellerdesigns gegenübergestellt. Die Propeller wurden auf gleiche Leistungsaufnahme ausgelegt, was in den Versuchen auch nachgewiesen wurde, siehe [6].

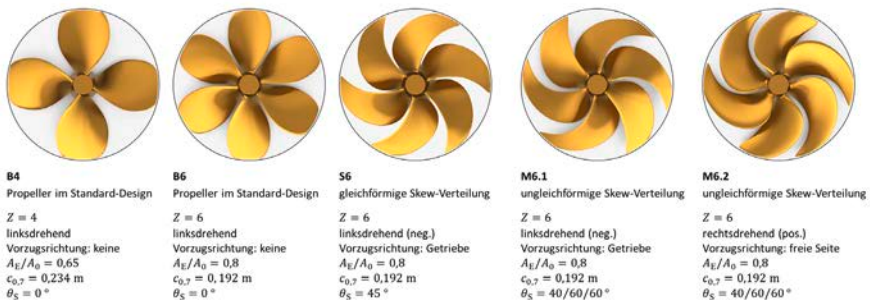


Abb. 7: Überblick über die untersuchten Propellerdesigns mit Angaben zur Flügelzahl Z, dem Flächenverhältnis  $A_E/A_0$ , der Sehnenlänge  $c_{0,7}$  am Radius  $r/R=0,7$  und dem Skew-Winkel  $\theta_S$ , die Drehrichtung bezieht sich auf das Saugen über die freie Seite

Die im Projekt gefertigten Propeller wurden mit Hilfe eines 3D-Handscanners vermessen. Dieser arbeitet mit einem Strukturlicht-Messverfahren. Hierbei wird ein Gitter auf die Oberfläche des Objekts projiziert und ein Foto aufgenommen. Durch die Verzerrung des Gitters kann ein Algorithmus die Krümmung der Geometrie berechnen. Da der Scan-Vorgang nur wenige Minuten dauert, kann dieses Messverfahren in den Fertigungsprozess eingebunden werden. Der Propeller B4 war nach 18 Iterationen so nachbearbeitet, dass die tatsächliche Geometrie von der Soll-Geometrie nur noch minimal abweicht. Abb. 8 zeigt den Propeller B4 nach dem letzten Arbeitsschritt. Links ist die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Geometrie zu sehen, rechts ein Foto vom Propeller.

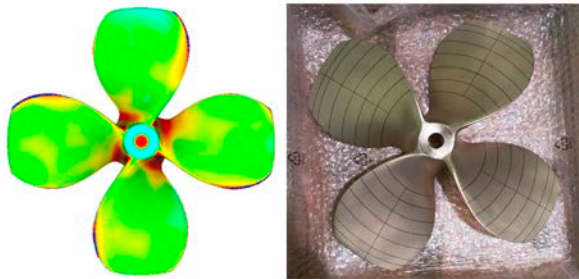


Abb. 8: Propeller B4 als 3D-Scan (Abweichung der Ist- von der Soll-Geometrie) und real

### 3.2 Validierung

Die Validierung ist ein essentieller Bestandteil einer jeden Studie. Das Ergebnis einer numerischen Simulation hängt von vielen Parametern ab. Dies hat zur Folge, dass neben dem physikalischen/geometrischen Einfluss auch eine numerische Komponente in den Ergebnissen enthalten ist. Entscheidendes Ziel des Projektes war es, die Prognosegenauigkeit der numerischen Strömungssimulationen zu quantifizieren. Hierzu wurde der in der Tiefwasserrinne getestete Versuchsaufbau simuliert. Der Fokus im Teilprojekt MemoProp lag auf der Betrachtung des Propellers.

Im ersten Schritt wurden die gemittelten Größen betrachtet. Hierzu wurde die Simulation mithilfe eines Potentiallösers initialisiert. Im zweiten Schritt wurde mithilfe eines multiplen Koordinaten-Systems im sogenannten „Frozen Rotor“-Verfahren eine zeitlich-stationäre Lösung initialisiert. Anschließend wurde eine instationäre Simulation mit rotierendem Propeller durchgeführt. Als Simulationsdauer wurde das Doppelte der gemittelten Tunnel-durchflussdauer genommen. Das ist die Zeit, in der ein Teilchen von dem einen Ende des Tunnels bis zum anderen gelangt.

In Abb. 2 ist der Propellerschub über der Propellerdrehzahl dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse beim Ansaugen über die freie Seite sehr gut getroffen werden. Beim Ansaugen über die Getriebeseite wird bei hohen Drehzahlen der Schub leicht unterschätzt.

Ein weiterer, sehr interessanter Punkt ist eine indirekte Validierung des Druckniveaus anhand des Kavitationseinsatzes im Experiment. Die Simulationen wurden einphasig durchgeführt, der Übergang zwischen Flüssig- und Gasphase wird also nicht simuliert. Mit Hilfe einer Iso-Fläche entsprechend des Dampfdrucks kann visualisiert werden, ob der Druck an dieser Stelle dem im Experiment entspricht. Aus Abb. 9 wird deutlich, dass das Einsetzen der Kavitation sehr gut abgebildet werden kann. Die Druckverhältnisse sind demnach in einem plausiblen Rahmen.

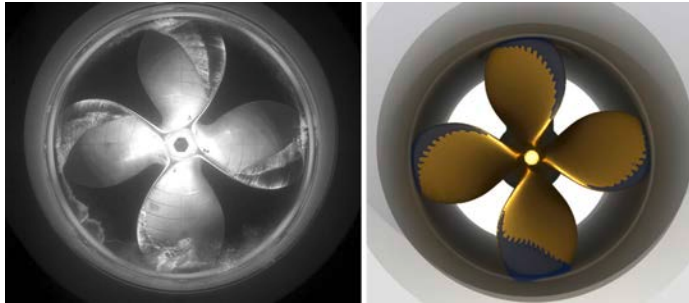


Abb. 9: Vergleich der Kavitation im Versuch (links) mit der Iso-Fläche für den Dampfdruck in der Simulation am Propeller B4

### 3.3 Einfluss der Propellergeometrie auf Druckpulse

Mit den validierten Simulationseinstellungen wurden die oben vorgestellten Propellerdesigns untersucht. Zur Bewertung der Druckpulse in den numerischen Strömungssimulationen wurde ein Auswertepunkt in die 12-Uhr-Position des Propellers gesetzt. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen den Unterschied zwischen Propeller B4 und B6. Es wird deutlich, dass der Propeller mit mehr Flügeln geringere Amplituden bei den Druckpulsen erzeugt.

Vergleicht man nun den konventionellen Propeller B6 (Abb. 11) mit einem mit Skew und Vorzugsrichtung (S6), so ist zu erkennen, dass die Amplituden weiter sinken (Vergleich Abb. 11 mit Abb. 12). Der Vergleich von Propeller S6 mit Propeller M6.1 in Abb. 12 zeigt zudem, dass durch die Skew-Variation aufeinanderfolgender Flügel auch die Druckpulse nun ungleichmäßig auftreten. Die Amplituden der Druckpulse des M6.1 liegen zudem nochmal unter denen des S6.

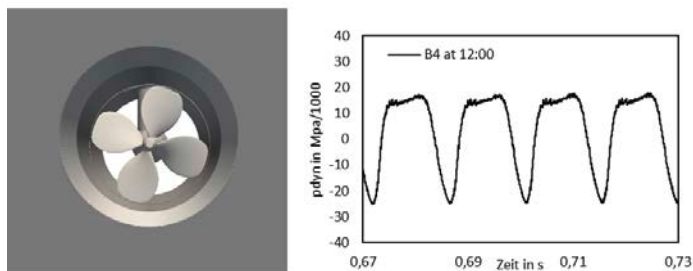


Abb. 10: Druckpulse des vierflügeligen Propellers B4

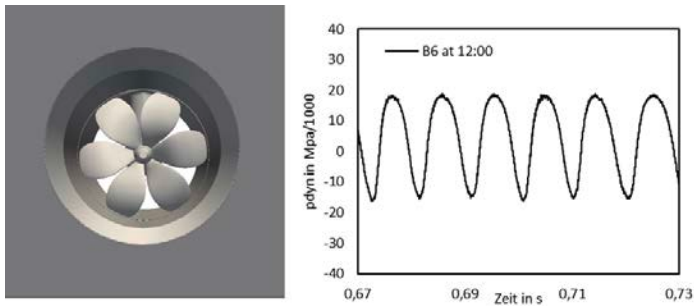


Abb. 11: Druckpulse des sechsflügeligen Propellers B6

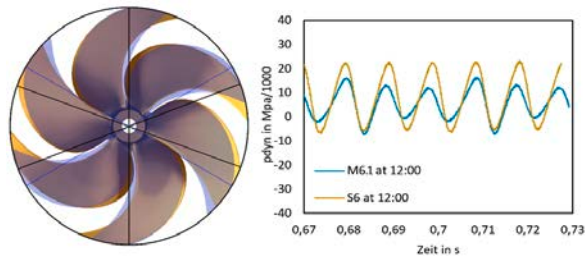


Abb. 12: Druckpulse des konventionellen Skew-Propellers S6 und des Propellers M6.1 mit variierendem Skew-Winkel aufeinanderfolgender Flügel

## 4. TU BERLIN – NUMERISCHE UND EXPERIMENTELLE ANALYSE DER WIRKSAMKEIT UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES FAHRZUSTANDES (QUERALFA)

### 4.1 Entwicklung und Validierung einer effizienten numerischen Methode zur Untersuchung von Querstrahlanlagen

Im Teilprojekt querAlfa der TU Berlin wurde eine numerische Methode zur Untersuchung von Querstrahlanlagen entwickelt. Zunächst wurde ein eigener RANS-Code, siehe [9] um die Methode der Sliding Grids erweitert und validiert. Anschließend wurden Simulationen der Strömung im Tunnel der QSA und im Umfeld der generischen Vorschiffssektion durchgeführt und das Verfahren mit Hilfe der Experimente validiert. Neben den Messungen des Partners Jastram wurde eigene Messtechnik entwickelt und erfolgreich verwendet, um die Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnel der QSA sowie den Druck an der Außenhaut des Versuchsträgers zu messen. In Abb. 13 links ist der entwickelte Geschwindigkeitsmessrechen zu sehen. Auf der rechten Seite sieht man die insgesamt zufriedenstellende Übereinstimmung der damit gemessenen und der berechneten axialen Geschwindigkeitskomponenten der äußerst komplexen Strömung bei drei Querstrahlerdrehzahlen.

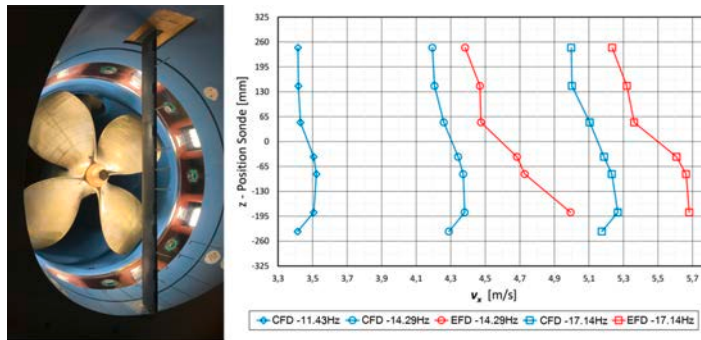


Abb. 13: Vergleich von gemessenen und berechneten axialen Geschwindigkeiten im Tunnel der QSA

Zusätzlich zu den sehr anspruchsvollen Berechnungen mit dem drehenden Propeller im Tunnel wurde dieser in den Simulationen durch ein ebenfalls entwickeltes Volumenkraftmodell (VKM) ersetzt, was zu einer erheblichen Verkürzung der Simulationsdauer führte. Die Qualität dieses mathematischen Modells wurde durch Vergleich der Ergebnisse mit denen der vorherigen Simulationen überprüft. In Abb. 14 sind die axialen Geschwindigkeiten im Tunnel unmittelbar vor dem Propeller aus den Simulationen mit drehendem Propeller sowie mit Volumenkraftmodell im Vergleich dargestellt. Es zeigte sich, dass das VKM sehr zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Man beachte, dass das linke Bild einen Schnappschuss bei einer gewissen Flügelstellung aus der instationären Simulation zeigt, während das rechte Bild aus der stationären Simulation mit VKM stammt.

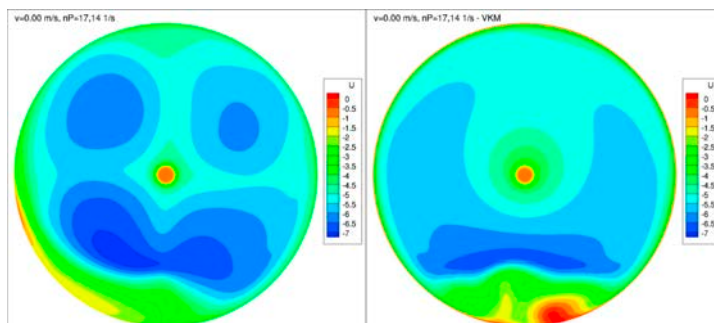


Abb. 14: Vergleich der berechneten axialen Geschwindigkeiten im Tunnel mit drehendem Propeller und VKM

#### 4.2 Untersuchung des Einflusses von Fahrzuständen auf die Wirksamkeit einer QSA

Die somit validierte und sehr effiziente Simulationsmethode wurde anschließend für einen Seenotrettungskreuzer der DGzRS in Großausführung angewendet. Hiermit wurden in fünf Kampagnen zahlreiche Fahrzustände und deren Einfluss auf die Wirksamkeit der QSA untersucht. Die Kampagnen umfassten Untersuchungen im Stand, bei Vorausfahrt, reinem Driften, reinem Gieren und kombiniertem Driften und Gieren, jeweils bei verschiedenen Vorausgeschwindigkeiten von 1 kn bis 8 kn sowie drei Propellerdrehzahlen.

Zur Untersuchung eines möglichen Einflusses der freien Wasseroberfläche (FO) auf die Wirksamkeit der QSA wurden ausgewählte Simulationen unter Berücksichtigung der FO bei diversen Geschwindigkeiten und Driftwinkeln wiederholt. In Abb. 15 ist das sich einstellende Wellenbild beispielhaft für eine reine Driffahrt dargestellt.

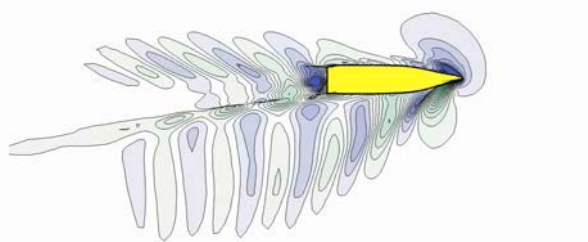


Abb. 15: Draufsicht der FO während einer stationären Driffahrt des Seenotrettungskreuzers

Abb. 16 zeigt, dass sich die Verteilungen der Wandschubspannung und des Druckes an der Position des (hier nicht vorhandenen) Tunneleinlasses im Fall mit und ohne FO kaum unterscheiden. Aus diesem Grund konnten die zahlreichen Simulationen der betrachteten Fahrzustände ohne FO durchgeführt werden.

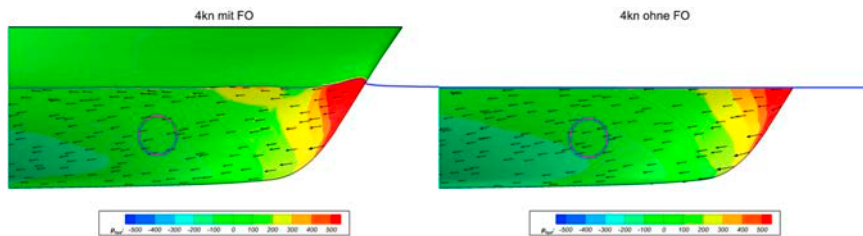


Abb. 16: Wandschubspannung und Druck am Ort des Tunneleinlasses bei Vorausfahrt

Die Untersuchung des Einflusses der Vorausfahrt auf die Wirksamkeit der QSA zeigte einen Verlust von bis zu 30 % der Gesamtquerkraft (aus Querstrahlerschub und Rumpfkraft) bei moderaten Vorausgeschwindigkeiten, siehe Abb. 18 links, was auf die sich ausbildenden Druckfelder am Rumpf zurückzuführen ist. Diese entstehen einerseits durch eine Verblockung der Schiffsumströmung durch den Propellerstrahl und andererseits durch eine Umlenkung des Propellerstrahls, welche wiederum von der Schiffsumströmung hervorgerufen wird. Der sich ausbildende Unterdruck am Tunnelauslass (Abb. 17 rechts in blau), also auf der Druckseite der QSA ist dabei größer als der entstehende Überdruck am Tunneleinlass (Abb. 17 links in rot). Aufgrund der vorteilhaften Position der Druckfelder ist das für das Manövrieren wichtige Giermoment weniger betroffen als die Quer­kraft, siehe Abb. 18 rechts. Dieses Verhalten wurde bereits in früheren Untersuchungen zur Wirksamkeit von Bugstrahlrudern beschrieben, siehe beispielsweise [11] und [12].

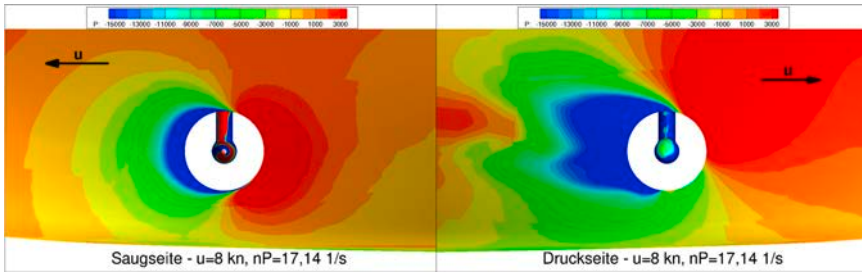


Abb. 17: Druckverteilung an Tunneleinlass (links) und -auslass (rechts) der QSA bei Geradeausfahrt

Der reine Propellerschub hingegen wächst durch den kleiner werdenden Volumenstrom im QSA-Tunnel bei zunehmender Geschwindigkeit, siehe Abb. 18, mittleres Bild. Bei schneller werdender Fahrt gewinnt der Propellerschub die Oberhand, sodass sich die Gesamtquerkraft beinahe wieder auf das Niveau ohne Fahrt erholt. Der begrenzende Faktor ist hier die Maximalleistung der QSA, da das Propellerdrehmoment mit dem Schub ansteigt. Wegen nicht vorhandener Leistungsreserve ist daher meist zu erwarten, dass nicht ausreichend Schub erzeugt werden kann, um dieses Niveau zu erreichen.

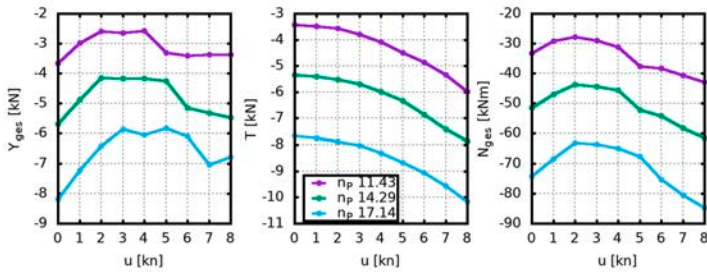


Abb. 18: Verlauf der Gesamtquerkraft, des Propellerschubes und des Gesamtgiermoments bei Vorausfahrt, für drei verschiedene QSA-Drehzahlen

Driften und Gieren hatten im untersuchten Fall keinen negativen Einfluss auf die Wirksamkeit. Für einige Ausnahmefälle zeigte sich sogar eine Steigerung. Eine Unterstützung von Rudermanövern durch die QSA ist daher durchaus denkbar. Es muss zu dieser Studie einschränkend gesagt werden, dass es sich bei jedem Rumpf und jeder QSA-Konfiguration um einen Spezialfall handelt. Im vorliegenden Fall hat die bauchige Form des betrachtenden Rumpfes einen positiven Einfluss auf die Wirksamkeit. Bei parallelen Seitenwänden wird ein größerer Einbruch der Querkraft erwartet.

Ebenso handelt es sich bei der untersuchten Rumpfform aufgrund des sehr kurzen QSA-Tunnels um einen Spezialfall. Bei großen Schiffen beträgt die Länge des Tunnels normalerweise Vielfache des Propellerdurchmessers, was die Strömung im Tunnel deutlich positiv verändert. Darüber hinaus handelt es sich im vorliegenden Fall um ein relativ kleines Schiff mit einer sehr leistungsfähigen QSA, wodurch deren Schub die dominierende Komponente in Gesamtquerkraft und -giermoment darstellt. Dies ist bei größeren Schiffen

ebenfalls nicht zu erwarten. Für eine Beurteilung der Wirksamkeit einer Querstrahlanlage sollte daher immer die reale Schiffsgeometrie herangezogen werden. Die entwickelte numerische Methode erlaubt eine zuverlässige, rein auf virtuellen Versuchen basierte, effiziente Vorgehensweise zu diesem Zweck, siehe [8].

## ZUSAMMENFASSUNG

Moderne Querstrahlanlagen sind für einen Dauerbetrieb auszulegen, energieeffizient zu gestalten und es gilt, strenger werdende Grenzwerte für Geräusch- und Vibrationspegel einzuhalten. Die Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten in querEVA waren einerseits Großausführungsmessungen an einer QSA unter Laborbedingungen in der Tiefwasserrinne der TU Berlin und andererseits numerische Full-Scale-Strömungssimulationen. Dem starken Einfluss viskoser Effekte wurde so Rechnung getragen und die Messungen sind für reale Anlagen direkt aussagekräftig.

Mit den Ergebnissen der Messungen und Berechnungen wurden Fragen zur Leistungsfähigkeit und zum Strukturschall bezogen auf die Einbaubedingungen, das Propellerdesign sowie bezogen auf den Fahrzustand des Schiffes beantwortet. Die numerischen Strömungssimulationen der drei Projektpartner und die experimentellen Untersuchungen haben sich hinsichtlich des tieferen Verständnisses der Strömungsverhältnisse an einer QSA in idealer Weise ergänzt. Diese Synergieeffekte konnten bei der Untersuchung zu stromverbessernder Maßnahmen, der Fahrzustandsabhängigkeit und bei der Entwicklung innovativer Propellerdesigns genutzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit einem angepassten Anlagendesign das Geräusch- und Vibrationsniveau einer QSA erheblich reduziert und zugleich der Wirkungsgrad gesteigert werden kann. Das Projekt querEVA ist damit ein wichtiger Beitrag für effiziente, sichere und leise Querstrahler.

## DANKSAGUNG

Wir möchten uns ausdrücklich beim Projektträger Jülich für die Begleitung, Beratung, die produktive Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken. Ein großer Dank geht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projektes. Ein ganz besonderer Dank gilt allen Helferinnen und Helfern, die die sehr aufwendigen und herausfordernden Messungen in Berlin unterstützt und ermöglicht haben.



## LITERATUR

- [1] International Maritime Organization (IMO): Resolution MSC.337(91) (adopted on 30 November 2012), Code on Noise Levels on Board Ships. 2012
- [2] Det Norske Veritas (DNV): Rules for Classification (Ships), Part 6 Additional Class Notations, Chapter 8 Living and Working Conditions. 2015
- [3] Bureau Veritas - Rules for Steel Ships, Part F, Additional Class Notations, Chapter 6, Comfort on Board. 2021
- [4] International Maritime Organization (IMO): MEPC.1/Circ.833, Guidelines for the Reduction of Underwater Noise from Commercial Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life. 2014
- [5] Det Norske Veritas (DNV): Rules for Classification (Ships), Part 6 Additional Class Notations, Chapter 7 Environmental Protection and Pollution Control, Section 6 Underwater Noise Emission - Silent. 2017
- [6] Hinnenthal, J., Koopmann, L. und Brade, M.: „Schlussbericht zum Projekt querSIGAMUT2: Bedarfsgerechte Querstrahlanlagen - Simulation und Großausführungsmessung am Umlauftank UT2; Verbundprojekt querEVA: Bedarfsgerechte Querstrahlanlagen - Entwicklung und Validierung einer Auslegungsmethodik“. FKZ (BMWi): 03SX441A. Hamburg, 2021.
- [7] Eberhard, Y., Mersmann, J. und Weinrich, B.: „Schlussbericht zum Projekt MemoProp: Bedarfsgerechte Querstrahlanlagen - Entwicklung einer Methodik zur Auslegung moderner Propellerdesigns bei Querstrahlanlagen mithilfe numerischer Verfahren und experimenteller Validierung; Verbundprojekt querEVA: Bedarfsgerechte Querstrahlanlagen - Entwicklung und Validierung einer Auslegungsmethodik“. FKZ (BMWi): 03SX441C. Erfstadt, 2021.
- [8] Cura Hochbaum, A., Blum, B., Schwarz-Beutel, J., Rieck, K.: „querAlFa - Querstrahlanlagen - Numerische und experimentelle Analyse der Wirksamkeit unter Berücksichtigung des Fahrzustandes. Abschlussbericht im Rahmen des BMWi-Verbund-Forschungsvorhabens querEVA - Bedarfsgerechte Querstrahlanlagen - Entwicklung und Validierung einer Auslegungsmethodik“. FKZ (BMWi): 03SX441B. Berlin, 2021.
- [9] Cura Hochbaum, A.: „Ein Finite-Volumen-Verfahren zur Berechnung turbulenter Schiffsumströmungen“. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1994.
- [10] Koopmann, L., Hinnenthal, J., Brade, M., Schwarz-Beutel, J., Cura Hochbaum, A. und Eberhard, Y.: „Dynamische Lasten einer Querstrahlanlage“. In: Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. Bd. 113. (2019). Schiffahrts-Verlag Hansa, Hamburg, 2020.
- [11] Chislett, M.S. und Bjorheden, O.: „Influence of Ship Speed on the Effectiveness of a Lateral-thrust Unit. Technical Report Hy-8“, 1966.
- [12] Brix, J.E.: „Manoeuvring Technical Manual. Seehafen Verlag, Hamburg, 1993



# LOMA –

LAGEBILDOPTIMIERUNG FÜR MARITIME AWARENESS

## AUTOREN

<b>DR. MARTINA BRÖTJE</b>	FRAUNHOFER FKIE, WACHTBERG
<b>ANASTASIA SCHWARZE</b>	FRAUNHOFER FKIE, WACHTBERG
<b>FLORIAN MOTZ</b>	FRAUNHOFER FKIE, WACHTBERG
<b>DR.-ING. JERONIMO DZAACK</b>	ATLAS ELEKTRONIK GMBH, BREMEN
<b>THORSTEN THOMAS</b>	ATLAS ELEKTRONIK GmbH, BREMEN
<b>DANIEL TIETJEN</b>	ATLAS ELEKTRONIK GmbH, BREMEN

## EINLEITUNG

Der maritime Raum ist Lebensgrundlage der internationalen Gemeinschaft und Hauptschlagader der globalen Wirtschaft: Erstens ist die See Handels- und Transportraum. Zweitens sind marine Rohstoffe Grundlage menschlichen Lebens und wichtige Handelsgüter. Und drittens gewinnt die See als Lebensraum angesichts der demographischen Entwicklungen immer mehr an Bedeutung.

Bis zu 80 Prozent des Welthandels werden zur See transportiert [1]. Gut ein Drittel des weltweit geförderten Erdgases und Erdöls wird im Meer gewonnen [2]. Und das Interesse am Abbau energetischer und mineralischer Rohstoffe im maritimen Raum steigt weiter an. Für die Versorgung der Weltgemeinschaft stellen maritime Ressourcen einen wichtigen Bestandteil dar.

Durch die zunehmenden Aktivitäten im maritimen Raum ergibt sich die Notwendigkeit, diesen auf, unter und über dem Wasser ganzheitlich zu überwachen und zu schützen. Daraus definieren sich die Ziele: Schutz kritischer maritimer Infrastrukturen, Verhinderung illegaler Aktivitäten wie Verschmutzung der Meere, illegaler Fischfang und Piraterie, Schutz der globalen Versorgungskette, Freiheit zur See sowie Sicherheit von Seeleuten und Passagieren [3].

Die maritime Sicherheit stellt eine zunehmende Herausforderung für alle Beteiligten dar. Dabei stehen Themen, wie die Sicherheit der maritimen Infrastrukturen, die Verlässlichkeit der Seeschifffahrt und der Schutz und die Überwachung der maritimen Räume im Mittelpunkt. Zunehmend wird der Bedarf von intelligenten und vollständigen Lagebildern für die maritime Sicherheit deutlich. Potentielle Nutzer streben aufgrund finanzieller und operativer Beschränkungen durchgängige Lösungen zur Erfüllung der Aufgaben zur Aufrechterhaltung der maritimen Sicherheit an.

Durch „LoMA – Lagebildoptimierung für Maritime Awareness“ wird dieser Bedarf adressiert und ein multi-operationelles Überwachungssystem für den maritimen Raum entwickelt und

demonstriert, das sowohl Bedürfnissen der Nutzer als auch Anforderungen und Interessen weiterer Stakeholder im maritimen Bereich berücksichtigt. LoMA nutzt Chancen, die sich aus der Vernetzung verschiedener Sensoren ergeben. Neben der Darstellung eines integrativen Lagebildes werden in LoMA Daten intelligent verknüpft und analysiert. Dabei werden Daten automatisch klassifiziert, priorisiert und mögliche (Bewegungs-)Anomalien erkannt.

Ein besonderer Fokus wurde auf die Herausforderungen einer Big-Data-Umgebung sowie auf die Integrität und Verlässlichkeit von Informationen gelegt. Dazu fasst LoMA Daten, Informationen und Lagebilder aus unterschiedlichsten Quellen zu einer einheitlichen Informationslage zusammen. Eine automatische Vorbewertung der Daten und die ergonomische Darstellung unterstützt den Anwender, Informationen zu erfassen und zu bewerten. Für die Risikoanalyse und -bewertung sowie die Datenpriorisierung wurden verschiedene Visualisierungs- und Interaktionsmethoden (z. B. Augmented und Virtual Reality, Sprach- und Gesteninteraktion und neuartige Projektionsmöglichkeiten) und neue Interaktions- und Fusionstechniken (z. B. modellgestützte Interaktion) untersucht. Die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) wurde anhand des wahrgenommenen Risikos in Abhängigkeit von der Visualisierung und des daraus abgeleiteten Risikobewusstseins optimiert.

Ein weiterer Schwerpunkt stellt die Einbindung von Unterwassersensoren für die ganzheitliche Maritime Awareness dar. Einzelnen Informationen und Datenquellen werden in LoMA in ein Gesamtsystem integriert, um durch die koordinierte Vernetzung der einzelnen Systeme den entscheidenden Mehrwert für das Überwachungs- und Sicherheitssystem zu generieren (siehe Abbildung 1). Betrachtet werden insbesondere Positionsdaten, wie z. B. AIS-Daten (Automatic Identification System), LRIT-Daten (Long-Range Identification and Tracking), VDS-Daten (Vessel Detection System), sowie Bild-Daten (z. B. von einem elektrooptischen Sensor und einer Kamera). Zusätzlich werden Daten aus einer Vielzahl von Quellen sowohl von Überwassersensoren als auch von Unterwasserdatenknoten integriert.



Abb. 1: Vernetzte Sensoren im Lagebild

## 2. LAGEBILDOPTIMIERUNG FÜR MARITIME AWARENESS

Ein besonderer Fokus des Überwachungs- und Sicherheitssystems LoMA liegt auf der Darstellung, Analyse und Bewertung stationärer und bewegter Objekte in den drei

Dimensionen des maritimen Raums (auf, unter und über dem Wasser). Nach der Datenfusion werden die extrahierten Informationen priorisiert und in einem Gesamtlagebild kontextbezogen für den Nutzer bereitgestellt. Um ein dynamisches Lagebild zu erzeugen, wurden Verfahren implementiert, die den zeitlichen Bewegungsverlauf der beobachteten Objekte berücksichtigen und in Aussagen über ein von der Normalität abweichendes Verhalten münden (sogenannte Anomalie-Detektion).

## 2.1. ANFORDERUNGSERSTELLUNG

Zur Entwicklung des zivilen Überwachungssystems als Teil eines ganzheitlichen Hafenschutzkonzeptes bestand der erste Schritt darin, den grundlegenden Nutzungskontext zu verstehen und festzulegen. Für die Konzeption des einheitlichen Lagebildes sollten außerdem Nutzungsanforderungen erhoben werden. Dazu wurden im Projekt zahlreiche Workshops und Interviews durchgeführt. Durch die Unterstützung der assoziierten Partner konnten insgesamt 17 Nutzer aus 4 Bundesländern befragt werden. Diese waren Vertreter unterschiedlicher öffentlicher Behörden, Institutionen aus dem Bereich „Hafensicherheit“, sowie Vertreter privater Hafenanlagenbetreiber. Dadurch konnte Einsicht in die Arbeitsweise unterschiedlicher Akteure gewonnen und umfassende Anforderungen erhoben werden. Unter den Nutzern konnten primäre und sekundäre Nutzer sowie mögliche Interessenten identifiziert werden.

Nach Erhebung des Ist-Standes wurde identifiziert, wo das Optimierungspotential für ein umfassendes Lagedarstellungssystem liegt. Die Anforderungen umfassen unter anderem die grafische Darstellung, die Multisensordatenfusion, die Usability sowie die Alarmierung. Einige beispielhafte Anforderungen sind:

- › Das System muss gefährliche Ziele kennzeichnen
- › Das System muss dem Nutzer die Möglichkeit bieten, Ziele auszuwählen

Für die Darstellung war unter anderem die Anzeige von folgenden Punkten relevant:

- › Elektronische Seekarte
- › Fusionierte Ziele
- › Kamerabilder
- › Entscheidungsunterstützung
- › Alarmmanagement

Für die konkrete Ableitung der Anforderungen richtete sich das Vorgehen nach der menschenzentrierten Systemgestaltung, beschrieben in der DIN EN ISO 9241-210 [4].

Dies erforderte, dass die Nutzer im Verlauf des Projektes mehrfach befragt wurden. Durch den intensiven Austausch mit den Nutzern wurde wiederholt erfasst, ob die Anforderungen im Sinne der Nutzer erhoben und umgesetzt wurden oder ob Anpassungen am System

vorgenommen werden mussten. Dies führte zu einem gut validierten System und erhöhte die Akzeptanz der Nutzer. Die aktive Mitarbeit an dem Gestaltungsprozess und die unterschiedlichen Methoden (Interview, „Lautes Denken“ und Usability-Test, siehe Kapitel 2.3) fanden bei den Nutzern großen Zuspruch.

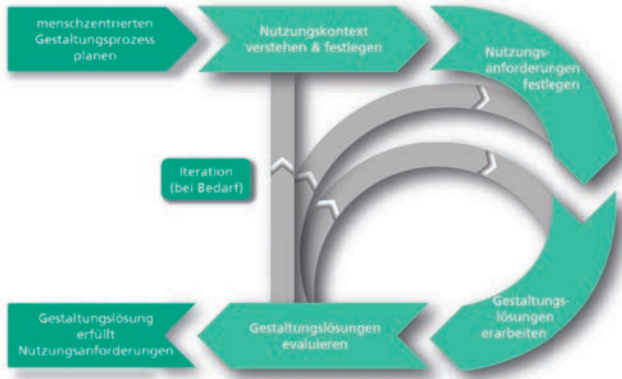


Abb. 2: Menschzentrierte Systemgestaltung nach der DIN EN ISO 9241-210

## 2.2. SYSTEMANALYSE UND ARCHITEKTUR

Die funktionalen Anforderungen wurden analysiert und in verschiedene Funktionsbereiche gegliedert. Parallel mit der Analyse der Anforderungen und der Gruppierung der Anforderungen in Teilbereiche wurde die Systemarchitektur iterativ entwickelt.

Das Ergebnis ist eine flexible Systemarchitektur, die die Integration von unterschiedlichen Datenquellen und Systemen ermöglicht (siehe Abbildung 3). Für LoMA wurde ein einheitlicher Systemkern definiert, der die Visualisierung, die Datenfusion und -analyse sowie die Datenspeicherung umfasst. Die Ausprägungen der Schnittstellen wurden über Web-Services realisiert. Somit können bestehende und zukünftige Datenquellen und Systeme mit LoMA verbunden werden und unabhängig vom Systemkern entwickelt werden.

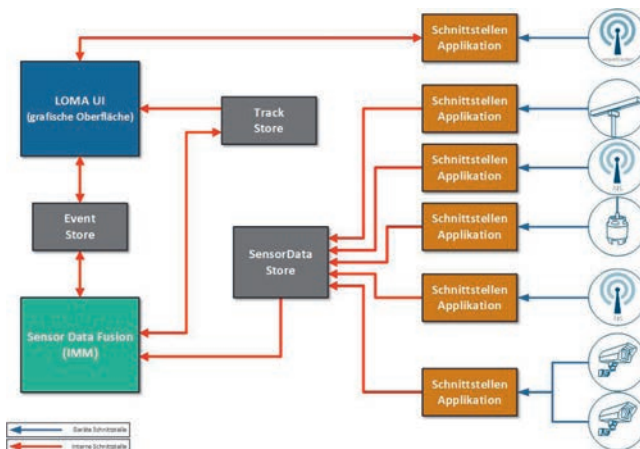


Abb. 3: Systemarchitektur LoMA

### 2.3. USABILITY TEST

Die mit den Nutzern erhobenen Anforderungen wurden in grafische Lösungen übertragen. Dazu wurde unter anderem das Prototyping-Tool „Axure“ verwendet, mit dem ein klickbares Mock-Up erstellt wurde. Wie bereits erwähnt, sieht die menschenzentrierte Systemgestaltung einen iterativen Prozess vor. Daher wurde das Human-Machine Interface (HMI) im Laufe des Projektes mehrfach mit den Nutzern diskutiert und angepasst.

Das finale Konzept sieht die Nutzung von zwei Bildschirmen vor. Der erste Bildschirm dient als Hauptbildschirm mit der Darstellung des Lagebildes und der Alarme inklusive der Entscheidungsunterstützung. Auf dem zweiten Bildschirm kann der Nutzer Zusatzinformationen zur Lage, wie Kamerabilder, sehen oder Funktionalitäten, wie Kontaktlisten und vorgefertigte E-Mails, aufrufen.

Nach mehreren Iterationen wurde das finale Konzept in Einzelinterviews mit einem Teil der Nutzer evaluiert. Dazu wurde ein Usability-Test durchgeführt, bei dem die Nutzer das Mock-Up selbst testeten und realistische Aufgaben, wie die Bearbeitung eines Alarms, durchführten. Anschließend wurden Fragebögen zum System und dessen Usability ausgefüllt.

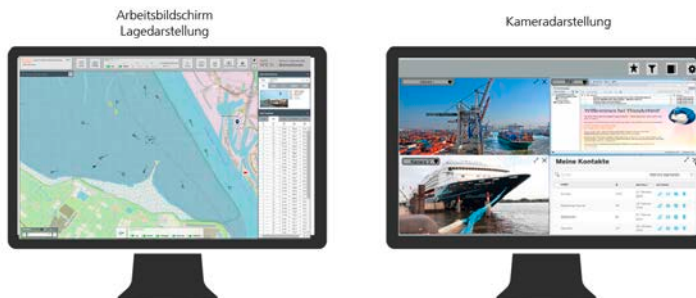


Abb. 4: Konzept für das HMI

Die Erkenntnisse aus dem Usability-Test wurden in das finale Konzept übertragen, das von Atlas Elektronik in ein Demonstrationssystem umgesetzt wurde. Dieses kann mit realistischen Daten befüllt werden, die während der Messkampagnen (siehe Kapitel 2.4) gesammelt wurden. Eine finale Evaluation des Demonstrationssystems konnte aufgrund der Covid-19-Pandemie nicht durchgeführt werden.

### 2.4. SENSOR DATA FUSION

Ziel der Sensordatenfusion ist der Aufbau eines umfassenden und konsistenten Lagebildes, das dem Nutzer eine rasche Einschätzung der aktuellen Situation ermöglicht. Dieses Lagebild ist außerdem Grundlage für die Anwendung automatischer Verfahren zur Erkennung potentiell bedrohlicher Ereignisse.

Der Schwerpunkt der Entwicklung der Sensordatenfusion lag auf dem Entwurf eines allgemeinen Fusionschemas, das die Einbindung von unterschiedlicher Sensorik, wie einfachen Kamerasensoren, aber spezifischen Sensoren (z. B. Sonar oder AIS) ermöglicht.

Die Konzeption umfasst daher unter anderem die Modellierung einer allgemeinen und parametrisierbaren Datenschnittstelle. Um die Kamerasensoren in diesen Mechanismus einzubinden, wurde als Vorstufe der Sensordatenfusion eine Detektionsstufe implementiert, die aus Bilddaten die Peilrichtung zu möglichen bewegten Objekten erzeugt.

Ein wesentlicher Baustein der hier dargestellten Sensordatenfusion ist eine integrierte Verifikationsstufe zur Prüfung der Integrität von Sensordaten. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Fusion der Daten und damit für den Aufbau eines konsistenten und verifizierten Lagebilds.

Abbildung 5 zeigt einen Auszug aus den in den Messkampagnen aufgenommenen Real-daten. Zusätzlich zu der Zieldarstellung auf der rechten Seite, sind auf der linken Seite verschiedene Diagramme zur Bewertung der Sensoren enthalten. Der Sensor-Score für unterschiedliche Sensoren links unten als Balkendiagramm gibt an, welche Sensoren effektiv zur Lagebilderstellung beitragen (d. h. die mit hohem Sensor-Score). Für zwei Kamerasensoren ist außerdem die Gegenüberstellung von Kamera- und AIS-Tracks gezeigt. Bei der hier gezeigten Darstellung handelt es sich um eine interne technische Darstellung zur Verifikation der Funktion der Sensordatenfusion, sie ist nicht identisch mit der HMI-Darstellung für die Nutzer.

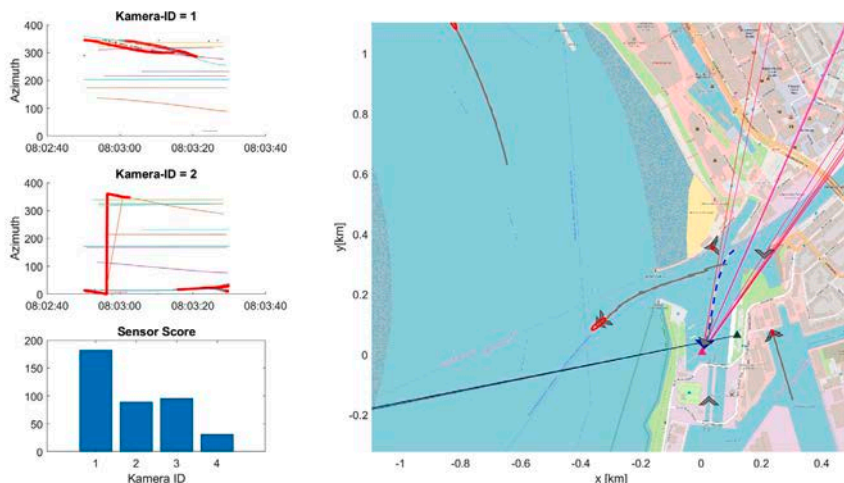


Abb. 5: Beobachtung des Sensor- und Zielverhalten in der technischen Darstellung. Links: Sensor-Scores und Sensorvergleich. Rechts: Zieldarstellung mit Tracks



Die Sensordatenfusion beinhaltet folgende methodische Blöcke:

- › die Verifikation der Sensordaten und die Detektion unerwünschten Sensorverhaltens
- › die Fusion verifizierter Sensordaten und Generierung von Tracks zu Booten und Schiffen
- › die Detektion von Zielanomalien anhand der zuvor generierten verifizierten Tracks.

Die Methoden der Sensordatenfusion wurden anhand von Daten aus Messkampagnen kontinuierlich evaluiert und weiterentwickelt. Abbildung 5 (rechts) zeigt das Hafenumfeld in Bremerhaven, in dem die Tests stattfanden. Mithilfe eines kooperativen Bootes (bereitgestellt durch bremenPorts) konnten dabei spezifische Zieltrajektorien getestet werden. Das kooperative Boot ist in der Abbildung über die blau-weiß gestrichelte Trajektorie gekennzeichnet, es simuliert für die Auswertungen ein Boot ohne ausgestrahltes AIS. Die Sensorstandorte sind in der Abbildung über die beiden Dreiecksymbole dargestellt. Die Ergebnisse der abschließenden Messkampagne demonstrieren den Gewinn in Form eines detaillierteren Lagebilds durch die Fusion unterschiedlicher Sensorik. Die Qualität und auch die Aufstellung der Sensorik spielt in diesem Zusammenhang aber eine entscheidende Rolle. Über einen experimentellen Aufbau im Hafenumfeld von Bremerhaven konnten die grundlegenden Eigenschaften eines Überwachungssystems mit dem LoMA-System nachgewiesen werden. Bei der eingesetzten Kamera- und Radarsensorik handelte es sich dabei um handelsübliche Sensoren, die nicht speziell für den gewählten Einsatz konzipiert sind. Folgenden Punkte wurden demonstriert:

- › AIS-Daten lassen sich verlässlich durch weitere Sensordaten verifizieren. Dadurch können fehlerhafte AIS-Meldungen rasch identifiziert werden.
- › Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass auch Boote ohne AIS detektiert und lokalisiert werden können.
- › Anhand vorgegebener Regeln und der Beobachtung des Trajektorienverlaufs der Tracks wurden Alarmmeldungen generiert.

Das System wurde während der Messkampagnen in Bezug auf die Behandlung von Mehrzielkonflikten sowie unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen getestet.

## 2.5. MENSCH-MASCHINE-INTERAKTION

Basierend auf den Mock-Ups und der Evaluation der Usability wurde für LoMA eine effiziente, effektive und zufriedenstellende Mensch-Maschine-Interaktion entwickelt. Dabei wurden die Aufgaben und Anforderungen nach Wichtigkeit für die zukünftigen Anwender bewertet und verfügbar gemacht. Zusätzlich wurde der Informationsbedarf der Anwender für die Bearbeitung der Aufgabe bewertet und als Grundlage für die Gestaltung der MMI genutzt. Das Ergebnis ist eine Aufteilung des Systems in zwei Hauptbildschirme (siehe Abbildung 6).

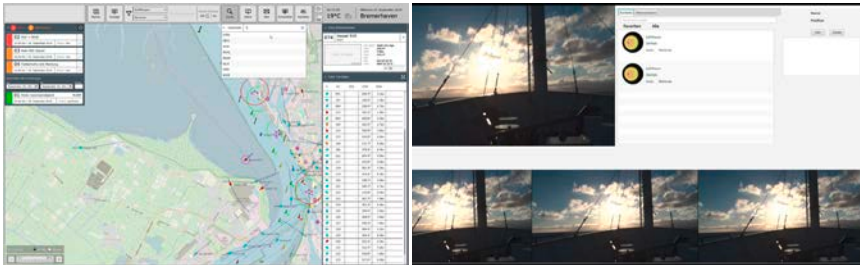


Abb. 6: Hauptbildschirme, Lagebild (links) (Quelldatei aus open street maps) und Videos und Kontakte/ Mail (rechts)

Der linke Hauptbildschirm zeigt das Lagebild mit detaillierten Informationen zu den Zielen, der ausgewählten Karte und dem Fenster für das Alarmmanagement („Lagebild“). Der rechte Hauptbildschirm präsentiert bis zu vier Videos der angeschlossenen optischen Sensoren, sowie einen Bereich für die Kommunikation mittels Email, Telefon, Internet („Videos & Kommunikation“). Die Bildschirme sind nicht als separate Medien zu betrachten, Aktionen im Bildschirm „Lagebild“, wie zum Beispiel das Betätigen der Taste „Kontakte“, haben direkten Einfluss auf die Präsentation im Bildschirm „Videos & Kommunikation“, da hier das Fenster für die Kontakte hervorgehoben wird.

Da der Hauptbildschirm „Lagebild“ das gesamte Überwachungsgebiet mit den Zielen darstellt, den Zugang zu fusionierten Daten und der Datenanalyse ermöglicht und speziell auch das Alarmfenster umfasst, soll hier darauf detaillierter eingegangen werden.

### Karte

Über die Taste „Darstellung“ gelangt der Nutzer zu den Einstellungen bezüglich des Kartentyps und der Karteninformationen, sowie weitere Einstellmöglichkeiten betreffend Umweltdaten, Schiffsinformationen und kritischer Infrastrukturen (siehe Abbildung 7). Während der Nutzer über die Auswahl „Kartentyp“ selektiv entscheidet, welche Art Karte als Hintergrund auf dem Lagebildschirm sichtbar werden soll, sind die anderen Auswahlmöglichkeiten eher als Filter zu betrachten, um die bestimmte Objekte zur Anzeige zu bringen oder nicht. Hier kann durch Filterung die Übersicht je nach Neigung des Nutzers gesteigert werden.

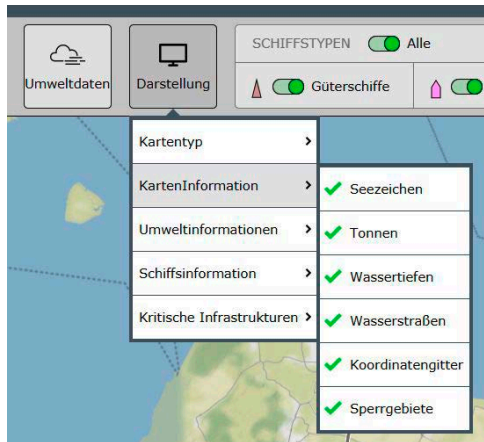


Abb. 7: Lagebild mit Einstellungen für die Darstellung

Ein weiterer Aspekt bei der Kartendarstellung ist der Maßstab und das Bewegen der Karte (siehe Abbildung 8). In diesem System kann der Nutzer die Karte mit Hilfe der Maus in alle Richtungen bewegen. Eine andere Möglichkeit besteht im Heraus- oder Herein-Zoomen über die grafische Anzeige. Parallel zur Maßstabs-Anpassung befinden sich auch die Einstellungen für die Länge des Fahrtvektors bei den Zielen, sowie für die Dauer der angezeigten „History Points“.

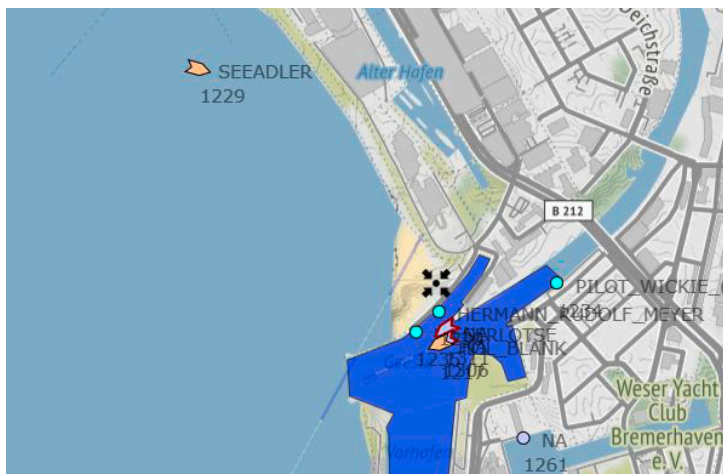


Abb. 8: Bildausschnitt für Maßstabsänderung und Längenangaben

### Track-Liste

Zusätzliche und detaillierte Informationen über ein Ziel zu erhalten ist eine der wichtigen Aufgaben des Nutzers. Dafür gibt es im System ein eigenes Fenster, das aus Gründen der Übersichtlichkeit minimiert werden kann.

Um die Track-Liste übersichtlich zu gestalten werden nur die folgenden relevante Attribute dargestellt: Typ, Nummer, Name, Distanz, Kurs über Grund (COG) und Geschwindigkeit über Grund (SOG) (siehe Abbildung 9).

Ziele Informationen					
Ziele Trackliste					
T	No.	Name	DIS	COG	SOG
☒	000	Refer...	0.00km	-	-
🏠	1236	NIDA	3.53km	000.0°	0.0kn
📍	1242	GLOV...	3.05km	000.0°	0.0kn
🏠	1251	NA	1.37km	356.3°	0.0kn
📍	1240	NA	3.04km	020.0°	0.0kn
📍	1254	FAIRP...	1.45km	000.0°	0.0kn
📍	1257	NORT...	3.58km	000.0°	0.0kn
🏠	1262	NA	1.70km	000.0°	0.0kn
📍	1257	NA	3.06km	199.2°	0.1kn
📍	1255	BUGS...	2.84km	000.0°	0.0kn
📍	1258	NA	2.12km	234.0°	0.0kn
📍	1311	NA	0.11km	236.2°	1.2kn
📍	1293	BUNK...	1.77km	000.0°	0.0kn
🏠	1259	NA	1.25km	000.0°	0.0kn
📍	1261	NA	0.42km	000.0°	0.0kn
📍	1310	NA	4.46km	048.6°	8.1kn
📍	1309	NA	1.06km	220.2°	3.0kn
📍	1306	NA	0.14km	242.9°	0.8kn
📍	1305	1EVE	1.90km	225.6°	2.1kn

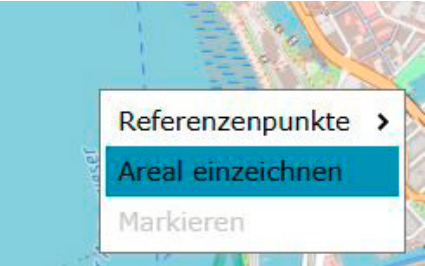


Abb. 9: Bildausschnitt für Track-Liste und Eingabe des Referenzpunkts

### Markierte Areale

Das System bietet verschiedene Möglichkeiten, Gebiete besonders hervorzuheben. Dabei kann der Nutzer diese Areale selber einrichten und konfigurieren. Er entscheidet zunächst auf welchen Typ die zu markierende Fläche basieren soll. Es gibt drei Möglichkeiten, die im Folgenden näher erklärt werden:

„Fläche markieren“: Der Nutzer erstellt ein farblich hervorgehobenes Gebiet mittels Polygone. Die einzelnen Eckpunkte können vom Nutzer frei definiert werden, d.h. hinzugefügt, entfernt oder verschoben werden. Das so erstellte Gebiet dient nur zur Orientierung und hat keinen Einfluss auf das Verhalten des Systems.

„Alarmbereich“: Dieses Gebiet wird genau wie jede andere Fläche vom Nutzer selber erstellt. Die farbliche Hervorhebung ist vom System vorgegeben, um die Fläche eindeutig als Alarmbereich zu definieren. Zusätzlich kann der Nutzer nun an diesen Bereich Regeln festlegen, die einen Alarm auslösen, wie zum Beispiel Betreten des Bereichs, Verlassen des Bereichs, Aufenthalt im Bereich zu bestimmten Zeiten, usw.

„Sperrgebiet einfügen“: Das Anlegen eines Sperrgebiets ist eine spezielle Form eines Alarmbereichs. Hier können aber vom Nutzer keine eigenen Regeln angebracht werden, sondern

der Aufenthalt in diesem Bereich wird auf jeden Fall eine Anomalie vom Typ „Verletzung Sperrgebiet“ aufrufen.

Da diese Bereiche eng mit dem Alarmmanagement verknüpft sind, werden die Flächen in einem Speicher abgelegt, der ebenfalls vom Informationsmanagement Modul gelesen werden kann, so dass dort überprüft wird, ob bestimmte Ziele die aufgestellten Regeln nicht befolgen und eine entsprechende Warnung oder Alarm ausgegeben wird.

### Anomalien/Events

LoMA überprüft regelmäßig den Ereignisspeicher und aktualisiert das Alarmfenster (siehe Abbildung 10). Neue Warnungen oder Alarme werden mit einem Ausrufezeichen und einer farblichen Umrandung dem Nutzer kenntlich gemacht. Bearbeitet der Nutzer ein Ereignis, verschwindet die Umrandung. Hat der Nutzer das Ereignis komplett bearbeitet und entsprechend gespeichert oder archiviert, wird die Warnung oder der Alarm aus dem Alarmfenster entfernt. Archivierte Ereignisse können jederzeit wieder dargestellt werden.

Bei der Bearbeitung einer Warnung oder eines Alarms bietet das System dem Nutzer einen Maßnahmenkatalog an, der abgearbeitet werden kann. Zusätzlich werden wichtige Ansprechpartner und Kontaktmöglichkeiten benannt, die das Bearbeiten eines Ereignisses unterstützen können.



Abb. 10: Bildausschnitt Alarmfenster und Detailsicht mit Maßnahmen

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes LoMA wurde Konzepte für die Datenfusion, die Datenintegrität sowie Algorithmen für die Anomalie-Detektion und die benutzer- und kontextbezogene Darstellung von Informationen in einem Gesamtlagebild entwickelt, implementiert und abschließend evaluiert. Für die effiziente, effektive und zufriedenstellende Mensch-Maschine-Interaktion wurden zukunftsweisende Methoden und Paradigmen eingesetzt und auf deren Anwendbarkeit überprüft.

In der finalen Evaluation von LoMA war zu erkennen, dass LoMA den Markterwartungen entspricht und einen wichtigen Baustein für die maritime Sicherheit darstellt. Die Verknüpfung der Informationen von unter, auf und über dem Wasser, sowie die Darstellung dieser Gesamtlage decken die Bedarfe des maritimen Sicherheitssektors ab und schließen heutige Lücken.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Projekt LoMA sollen in bestehende und neue Projekte des Projektkonsortiums für den Schutz von Häfen, Küsten und kritischen maritimen Infrastrukturen eingesetzt werden.

Besonders die neuartigen Methoden der MMI stellen eine wichtige Erweiterung dar. Durch die an-wenderzentrierte MMI, die den Anwender intelligent und kontextbezogen unterstützt, können die zukünftigen Anwender bedarfsgerecht angeleitet und informiert werden. Auf Basis des Experimentalsystems sollen die jeweiligen Lösungen weiterentwickelt und in das Produkt- und Projektportfolio integriert werden.

Eine Erweiterung der Sensorik ist für die weitere Entwicklung angedacht, so dass Satellitenbilder oder mehrere Tauchsonare angebunden werden.

## **DANKSAGUNG**

Das Verbundprojekt LoMA wurde durch die Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie ermöglicht. Hierfür möchten wir uns im Namen des gesamten Konsortiums bedanken. Dieser Dank gilt weiter den Mitarbeitern des Projektträger Jülich für die Koordinierung und Unterstützung über die gesamte Projektlaufzeit.

Wir danken bremenPorts und der Wasserschutzpolizei Kiel für die Organisation der Workshops und Interviews, sowie allen interviewten Personen für die aktive Unterstützung. Ein weiterer Dank geht an bremenPorts für die Bereitstellung der Örtlichkeiten und des Boots während der Messkampagnen.

## LITERATUR

- [1] Review of Maritime Transport (Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2015), S. 22.
- [2] World Ocean Review 3. Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken (Hamburg, maribus, 2014), S. 10.
- [3] Council of the European Union: „European Union Maritime Security Strategy“. Brussels, 2014.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.





# GKOM 2020 –

INNOVATIVE BRENNRAUMKOMPONENTEN FÜR GROSSMOTOREN IM MARITIMEN BEREICH

## AUTOREN

<b>DIPL.-ING. PETER KOLBE</b>	GESENKSCHMIEDE SCHNEIDER GMBH AALEN
<b>CHRISTIAN KUHN</b>	GESENKSCHMIEDE SCHNEIDER GMBH AALEN
<b>PROF. DR.-ING. HABIL. SIEGFRIED BLUDSZUWEIT</b>	MET ROSTOCK
<b>ENRICO ROTHE</b>	WTZ ROSSLAU GGMBH
<b>DIPL.-ING. HENDRIK SPECHT</b>	WTZ ROSSLAU GGMBH
<b>DIPL.-ING. ANDRE WAGNER</b>	IWU FRAUNHOFER CHEMNITZ
<b>DIPL.-ING. TIM LEHNERT</b>	IWU FRAUNHOFER CHEMNITZ
<b>PROF. LUTZ KRÜGER</b>	TU BERGAKADEMIE FREIBERG IWT
<b>DR. ANDREAS KESSLER</b>	TU BERGAKADEMIE FREIBERG IWT

## 1. GESAMTZIEL DES VORHABENS

Im Entwicklungsthema G-KOM 2020 wurde der Fokus auf ein ganzheitliches Brennraumkonzept mit Hochtemperatur-Verbundwerkstoffen gerichtet. Der Schwerpunkt liegt auf der simulationsgestützten Entwicklung verschiedener Kolbenlösungen. Diese sind unter Berücksichtigung industrieller Gesichtspunkte als funktionelle und effiziente Leichtbauvarianten gemeinsam mittels projektübergreifenden Managements zu entwickeln.

Es wurde die Kombination aus einer gegossenen Vorform aus Stahlguss (schmiedbare Stahlgusslegierung) und einem sich anschließenden Umformprozess (Schmieden) für die Herstellung geometrisch hoch komplexer Bauteile mit höchsten Festigkeitsanforderungen angestrebt. Dabei sollten die Kriterien des Leichtbaus oberste Priorität haben.

Das neue Verfahren soll zudem auf ein großes Teilespektrum anwendbar sein. Die Vorteile des Verfahrens liegen im optimierten Materialeinsatz bei gleichzeitig sehr guten Festigkeitseigenschaften.

Eine Schwachstelle ist laut Stand der Technik die Verschraubung von Kolbenboden und Kolbenhemd. Die Alternative dazu wird in einem stoffschlüssigem Verbindungsverfahren, dem Reibschweißen, gesehen.

Deshalb war mit dem Vorhaben eine Pionierarbeit unter dem Aspekt einer vergleichbaren oder höheren Zuverlässigkeit der reibgeschweißten Kolben gegenüber traditionellen verschraubten Kolben, bestehend aus Kolbenober- und -unterteil, zu leisten. Ein Schwerpunkt

war die Entwicklung eines durchgehend simulationsgestützten Dimensionierungsverfahrens für den thermomechanisch hybridreibgeschweißte Großmotorenkolben, welche eine realistische Vorhersage der angestrebten und erreichbaren zukünftigen Produkteigenschaften mit den neuartigen Technologieelementen erlaubt.

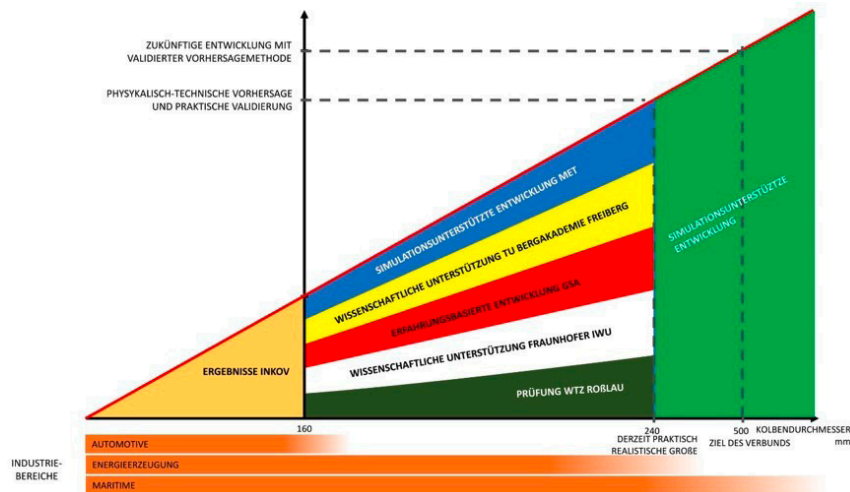


Abb. 1: Zukünftige Entwicklung mit validierter Vorhersagemethode

Ein weiterer inhaltlicher Schwerpunkt der geplanten Technologieentwicklung ist das Fügen von Werkstoffen mit deutlich unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften, um maßgeschneiderte Bauteileigenschaften bei günstigen Materialpreisen zu ermöglichen. Das neuartige thermomechanische Hybridreibschweißverfahren ist nicht nur auf Energieeintrag durch die Rotationsenergie der Reibschweißmaschine begrenzt, sondern erhält zusätzlich eine frei steuerbare thermische Energiezufuhr.

Hauptschwerpunkt war das enge Zusammenwirken von industriellen Partnern mit wissenschaftlichen Institutionen zur grundlegenden Bearbeitung der industriellen Aufgabenstellungen, und die Verknüpfung von Gieß- und Schmiedeprozessen zur Herstellung von Kolbenunterteilen, verbunden mit einer extremen Leichtbauweise für Schiffsmotoren der neuen Generation.

Die besondere Herausforderung für die Modellentwicklung des neuartigen Hybridreibschweißprozesses ergab sich aus den physikalisch sehr unterschiedlich und schwer zu beschreibenden kombinierten mechanischen und thermischen Prozessbedingungen,

Die vorausschauende simulationsgestützte Optimierung der Prozessabläufe beinhaltet ein beträchtliches Einsparungspotenzial in der Vorbereitung des neuartigen Schweißprozesses und verkürzte dadurch die Entwicklungszeiten und senkte die Kosten für neue Komponenten erheblich.

Die wissenschaftlich-technischen Zielstellungen des visionären Entwicklungszweiges beruhen auf der Grundlage, die Technologien Gießen und Schmieden in einer Prozessabfolge zu vereinen und so in Bezug auf die Herstellung eines Kolbenunterteils, eine material- und energieeffiziente Prozessroute zu schaffen.

Konventionelle Ansätze zur Herstellung komplexer Bauteile aus Stahlwerkstoffen betrachteten bislang Ur- und Umformverfahren lediglich stark abgegrenzt zueinander. Das visionäre Ziel lag in der einwandfreien Bauteilherstellung in Folge einer Verknüpfung der Technologien des Gießens und Schmiedens. Neben einer Minimierung des Materialeinsatzes sowie des Fertigungsaufwandes (optimierte Schmiedeanfangsform in Folge einer gießtechnischen Auslegung mit höchstmöglichem Materialausnutzungskoeffizient) war ein weiteres Ziel, die Erzeugung einer definierten Gefügeänderung durch eine sich anschließende Warmmassivumformung, die zu einer Erhöhung der Betriebsfestigkeit und der Lebensdauer des Kolbenunterteils führen sollte.

Durch eine stetige wechselseitige Überprüfung zwischen den verschiedenen Modellierungen und den sich anschließenden experimentellen Untersuchungen, sollte das Risiko möglicher Fehler so gering wie nur möglich gehalten und eventuell notwendige Iterationschleifen verringert werden.

Die schrittweise simulationsgestützte Entwicklung und Untersuchung der Technologieabfolge des Gießens mit einem sich anschließenden Schmieden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Gieß- als auch Umformsimulationen sollten durch experimentelle Versuche verifiziert werden. Gleiches gilt für die Untersuchungen in Hinblick auf die sich im Projektverlauf ergebenden alternativen Herstellungsverfahren und Werkstoffe.

Das neuartige thermo-mechanische Hybridreißschweißverfahren ist im Energieeintrag nicht mehr nur auf die Rotationsenergie der Reibschweißmaschine begrenzt, sondern hat eine zusätzliche frei steuerbare thermische Energiezufuhr erhalten.

Schwerpunkte dieses Forschungsthemas waren:

Verschiebung der technologischen Möglichkeiten in Motorenkonzepten bei Einsatz von Brennstoffkombinationen Gas, Diesel, Schweröl

- › Untersuchung der Kolben und Ventile, bezüglich des Einsatzes in anderen Motortypen hinsichtlich ihrer „Vielstofffähigkeit“ und zu verifizieren (s. ECA-Gebiete, Art der Brennstoffe, Schweröl, Gas- bzw. Dieselmotor, Dual-Fuel, Kraftstoffverbrauch usw.)
- › Einsatz hybrider Werkstoffverbunde für Bauteilkomponenten in der Abgasrückführung (Schwerpunkt ist Heißgaskorrosion)
- › Ausweitung auf andere Bauteile in Großmotoren (Ventilsitzring, Kompressionsring, Vorkammer, Laufbuchse usw.)

- › mehrdirektionales Schmieden von Monokolben als Leichtbauvariante als material- und energieeffizientes Verfahren der Warmmassivumformung
- › Die zu entwickelnden neuen Verfahren der Qualitätssicherung zielten ebenfalls darauf ab, bereits jedes experimentelle Teilergebnis auf seine Richtigkeit und Zuverlässigkeit zu überprüfen, um Schwachstellen der Entwicklung zeitnah zu identifizieren.
- › Weiterhin galt es, die Erfahrungen aus Prüfentwicklungen für kleinere Kolben auf große maritime Kolben zu übertragen. Hier sollten neue Methoden mittels der Computertomographie auf ihre Möglichkeiten untersucht werden.
- › Im Rahmen der Werkstoffprüfung von Werkstoffverbunden sollten geeignete Prüfverfahren entwickelt werden, um Werkstoffkennwerte, wie z. B. die Zugfestigkeit des Verbundes, bestimmen zu können. Ebenso war es notwendig, eine geeignete Wärmebehandlungsstrategie für die Werkstoffverbunde zu entwickeln.
- › Dazu ist die Verwendung von geeigneten Prüfsensoren erforderlich. Das Kolbenunterteil sollte speziell auf mögliche Gussfehler, wie Lunken, Schwindungsrisse oder Poren geprüft werden. Auch die Reibschweißnaht zwischen Kolbenoberteil und Kolbenunterteil wird einer speziellen zerstörungsfreien Prüfung unterzogen.
- › Das Korrosionsverhalten unter dem Einfluss hoher Temperaturen und Brenngase sollte ebenfalls untersucht werden. Dazu war es notwendig, Grundlagen in der Heißgaskorrosionsprüfung zu schaffen und geeignete Anlagentechnik und Prüfverfahren zu nutzen. An bauteilnahen Geometrien wurden Thermoschockversuche durchgeführt, um die Stabilität des Werkstoffverbundes unter raschem Temperaturwechsel zu bestätigen.
- › Im Bereich des herzustellenden Kolbenunterteils war die Produktion eines gegossenen Bauteiles beabsichtigt, welches seine Endgeometrie durch anschließendes Umformen/Schmieden erhält. Das Urformverfahren Gießen in verlorene Formen („Sandformen“) ermöglicht eine nahezu unbegrenzte Gestaltungsfreiheit im Hinblick auf die Bauteilgeometrie. Die Herstellung von Schmiedeanfangsformen durch Gießen bringt eine ganze Reihe von Vorteilen mit sich. Durch die Verarbeitung der vorgeformten Bauteilrohlinge wird der zur Umformung notwendige Aufwand geringer, wodurch eine beträchtliche Material- und damit auch Energieeinsparung erzielt werden kann. Durch die heute zur Verfügung stehenden Formtechnologien mit verlorenen Formen ist zudem eine wirtschaftliche Fertigung im Bereich kleinerer, mittlerer und bei Bedarf auch größerer Stückzahlen möglich.

Die Besonderheit des Projektes war die Kombination eines Stahloberteiles mit einem Guss Unterteil. Dabei rückte die gesamte umformtechnische Prozesskette in den Fokus der Prozessentwicklung. Angefangen bei der Erwärmung der Rohlinge über den eigentlichen Umformprozess bis hin zur gesteuerten Abkühlung. Das neuartige thermomechanische Hybridreibschweißverfahren bringt den Energieeintrag nicht mehr nur durch die Rotationsenergie der Reibschweißmaschine ein, sondern beinhaltet eine zusätzliche frei steuerbare thermische Energiezufuhr. Über diese zweite unabhängige Energiezufuhr wird die Temperatur der Reibpartner den Erfordernissen der thermischen Stoffeigenschaften der zu ver-

bindenden Teile gezielt angepasst und dadurch eine qualitativ hohe Schweißverbindung realisiert. In dieser Ergänzung bisher rein mechanisch wirkender Reibschweißmaschinen mit zusätzlichen thermischen Energiequellen wurde geprüft und untersucht, um welche interessanten Fertigungsschritte die bisherige Reibschweißanlage für thermische Behandlungen ergänzt (Vorwärmen, Spannungsarmglühen, Härten, Anlassen) und damit die Wertschöpfungskette erweiterungsfähig ist.



Abb. 2: neue Herausforderung des GKOM 2020 Projektes

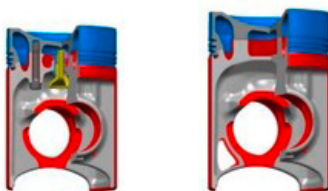


Abb. 3: links= gebauter Kolben, Serie, rechts= Visionärer Kolben bis  $\varnothing 450 \text{ mm}$ , gewichtsoptimiert

- Keine Schrauben notwendig
- Keine Gewinde
- Keine Passungen
- Weniger Gewicht, bis 30 %
- Verschiedene Materialien
- Beliebige Durchbrüche im Nichtbelasteten Bereich möglich
- Senkung der Produktionskosten, bis 30 %
- Verkürzung der Entwicklungszeiten, bis 50 %
- Schnelles und sicheres Fügen der Bauteile

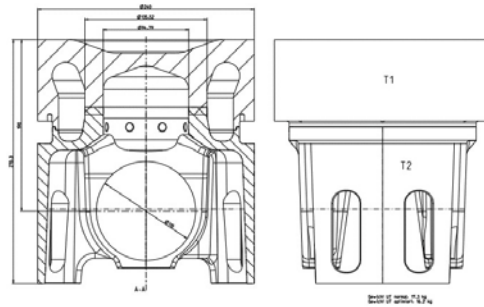


Abb. 4: Kolben  $\varnothing$  240 mm, gewichtsoptimiert, nach Reibschweißnahtberechnung und Simulation des Reibschweißprozesses

Eine Nachfolgende Wärmebehandlung bei unterschiedlichen Werkstoffen muss nach dem Werkstoff des Kolbenoberteil erfolgen



Abb. 5: Reibgeschweißter Großkolben, links Unterteil= Gusswerkstoff, Mitte Oberteil = Vergütungsstahl

Im Verbundvorhaben wurde nicht nur eine neue Fertigungstechnologie, das thermomechanische Hybridreibschweißverfahren für die Herstellung von Großmotorenkolben entwickelt, sondern ebenfalls moderne Prüfverfahren und Vorschriften zur Qualitätssicherung. Die Verknüpfung von Gieß- und Schmiedeprozessen zur Herstellung von Kolbenunterteilen und weiteren Komponenten mit dem visionären Ziel einer extremen Leichtbauweise mit deutlich verbesserten Festigkeitseigenschaften konnte durch moderne Simulationsverfahren entwickelt werden.

Zielstellungen im Teilprojekt war die Nutzung des weitverzweigten Forschungsnetzwerkes für alle Projektpartner.

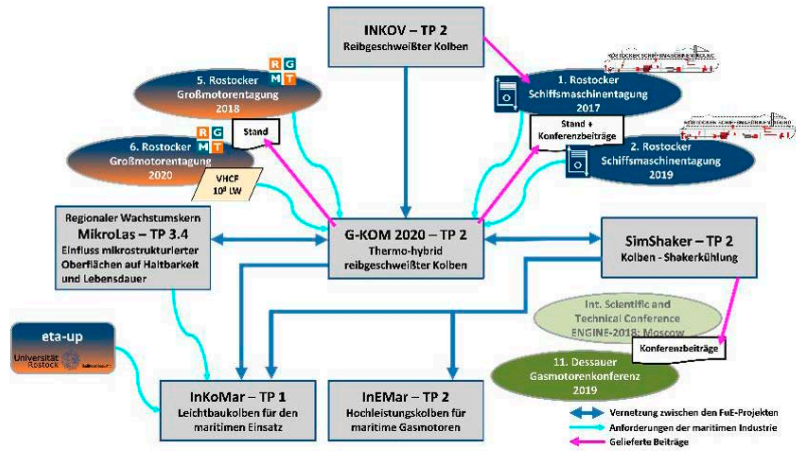


Abb. 6: Forschungsnetzwerk

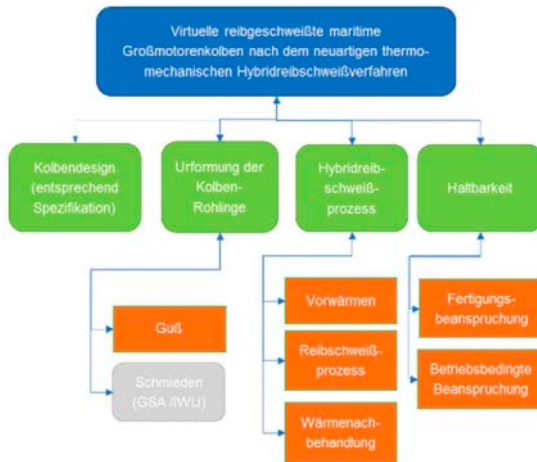


Abb. 7: Gegenstand und Struktur des virtuellen Prozesses

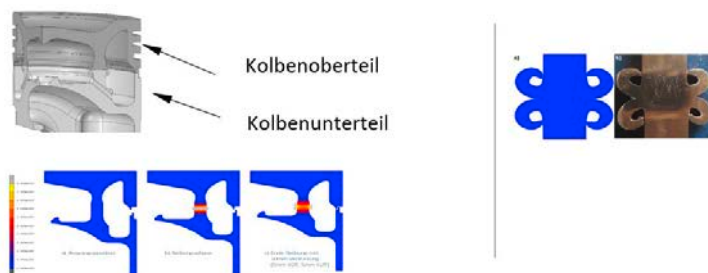


Abb. 8: Reibschweißvorgang, oben links: Übersicht, oben rechts: Evaluierung der vorhergesagten Reibschweißnaht (Wulstausbildung), unten: ausgewählte Phasen des Reibschweißprozesses



Abb. 9: Ausstellungsstand des G-KOM2020 Projektes auf 6. Rostocker Großmotorentagung

Die komplexe Entwicklung verlief in verschiedenen Teilschritten bzw. Unterarbeitspaketen wie der Ermittlung der Randbedingungen, der Erstellung eines Lastenheftes, der Berechnung der Bewegungsvorgänge und Kräfte am Kolben, der Konstruktion von präferierten Kolbenvarianten mit dem 3D-CAD-Programm Pro/ENGINEER Creo, der Erstellung einer Entscheidungs- bzw. Bewertungsmatrix, der Definition der Kolbenbelastungen für die FEM, den Gestaltfestigkeitsuntersuchungen mittels numerischer Berechnungsverfahren, der Simulation der Shakerkühlung zur optimalen/aktiven Kolbenkühlung, der weiteren Optimierung der Kolbenkonstruktion unter Berücksichtigung der Berechnungsergebnisse und dem Ziel der maximalen Gewichtsreduktion und Gestaltfestigkeit, der Durchführung des rechnerischen Festigkeitsnachweises für Maschinenbauteile (FKM-Richtlinie) und als letztes der Ermittlung der Kolbenformkure mit der Erstellung von Fertigungszeichnungen.

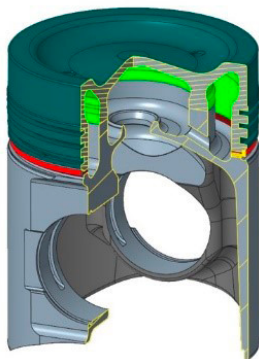


Abb. 10: Konstruierter thermomechanisch reibgeschweißter Kolben für den FM29/24



Der untersuchte Teilbereich beinhaltet Untersuchungen zu dem Reibschweißverhalten von thermisch vorbehandelten Proben sowie von der Beeinflussung der Herstelltechnologie Gusswerkstoff mit anschließendem Schmieden. Weiterhin ging es um die Beurteilung des Wanddickeneinflusses auf die mechanischen Eigenschaften und der Größe der Reibschweißfläche im Fertigungsprozess.

Dazu erfolgten Untersuchungen an reibgeschweißten Rundproben mit Durchmessern bis 54 mm bezüglich statischer und dynamischer Festigkeitswerte. Die erhaltenen Ergebnisse konnten mit bekannten Eigenschaften in Wöhlerkurven (Spannungsniveau aufgetragen gegenüber den erreichten Lastwechselzahlen) ins Verhältnis gebracht werden. Bei den verschiedenen Werkstoffkombinationen sind folgende Trends nachweisbar: 1. Die Kombination Vergütungsstahl mit EN-GJS700 zeigt abfallende Festigkeitswerte mit zunehmendem Randabstand, 2. Die Kombinationen MCG3, 38MnVS6 und 42CrMo4 zeigen gleiche bzw. höhere Festigkeitswerte mit zunehmendem Randabstand.

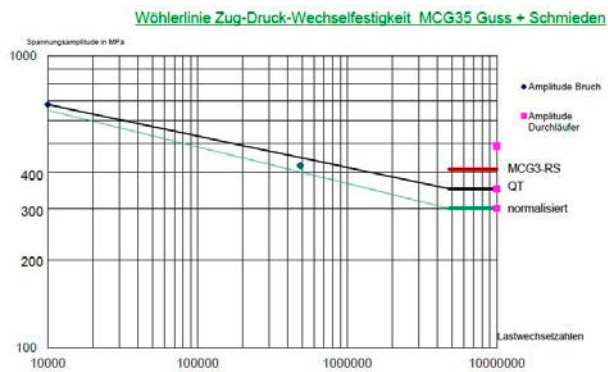


Abb.11: Wöhlerkurve für den Werkstoff MCG35 für eine Zug-Druck- Wechselfestigkeitsbeanspruchung im gegossenen und anschließend geschmiedeten Zustand

Kennwerte lagen im Bereich von 340 bis 400 MPa und sind durchaus vergleichbar mit Werten von ungeschweißten Werkstoffen.

Da die geplante Kolbenkonstruktion aus zwei Werkstoffen für das Kolbenober- und -unterteil bestehen wird, wurden nicht nur die Reibschweißkombinationswerkstoffe, sondern auch die Wärmebehandlung untersucht. Hier war insbesondere der Einfluss der vorgewärmten und reibgeschweißten Kontaktbereiche zu beachten. Neben Schmiedewerkstoffen kamen auch Gussproben verschiedener Hersteller zur Prüfung. Die Wärmebehandlung wurde an die Erfordernisse des geplanten Kolbenoberteilwerkstoffes angepasst. Die Gussproben zeigten auch hier deutliche Abweichungen zu den Schmiedewerkstoffen hin zu geringeren Werten.

Die Fertigung eines thermomechanisch reibgeschweißten Großkolbens ist von den Möglichkeiten der Fertigungstechnologie (Reibschweißmöglichkeiten) und auch von der möglichen Wärmebehandlung abhängig. Unter Beachtung dieser Randbedingungen erfolgte die Kolbenberechnung und Konstruktion des Großmotorkolbens  $\varnothing$  240 mm.

Ein Forschungsschwerpunkt lag innerhalb des Verbundprojekts auf der simulationsgestützten Entwicklung einer effizienten und robusten Fertigungstechnologie (Labormaßstab) für einen innovativen Leichtbaukolben für Großmotoren im maritimen Bereich

Optimierung des Eigenschaftsprofils des Kolbens sowie die Wirtschaftlichkeit, resultierend aus Energie- und Materialeinsparungen, des Herstellungsprozesses hatten oberste Priorität.

Inhaltlich lassen sich zwei Schwerpunkte für die erfolgten Untersuchungen definieren:

- › Entwicklung einer effizienten Prozesskette zur Herstellung von hochwarmfesten und korrosionsbeständigen Kolbenoberteilen (KOT)
- › Entwicklung einer Verfahrensabfolge aus Gieß- und Umformprozess zur Herstellung eines Leichtbaukolbenunterteils (KUT)

Aus eigenen unveröffentlichten Arbeiten sowie dem Vorgängerprojekt „INKOV“ ist bekannt, dass Kolbenoberteile (KOT) die wie folgt gefertigt werden: Beschichtung eines Stahlgrundkörpers mit pulverförmigen hochwarmfesten Zusatzwerkstoffen → Umformung des hybriden Werkstoffverbunds zu einem endkonturnahen Kolbenoberteil → Wärmebehandlung, sich deutlich in ihren Eigenschaften in Bezug auf Warmfestigkeit und Widerstand gegen korrosive Medien von den konventionell gefertigten Bauteilen abheben. Wie erwähnt steht die Wirtschaftlichkeit, gleichbedeutend mit Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung, an oberster Stelle der zu entwickelnden Fertigungstechnologie. Daher wurde versucht alle Prozessschritte simulativ abzubilden und in ihrer Gesamtheit zu optimieren. Abschließend lässt sich für diesen Forschungsschwerpunkt festhalten, dass eine einlagige Beschichtung mittels Plasma-Pulver-Auftragsschweißen und eine Wärmebehandlung, ausgerichtet auf den hochwarmfesten Zusatzwerkstoff (Rene41), Festigkeiten im Werkstoff erzielen, die einen konstruktiven Leichtbau für Kolbenoberteile zulassen und genügend Potential für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet bieten.

Basierend auf umfangreichen Grundlagenuntersuchungen zur Werkstoffcharakterisierung und einzelnen Prozessschritten, wurde vom IWU der Forschungsschwerpunkt „Prozesskombination Gießen + Schmieden zur Herstellung eines Leichtbaukolbenunterteils“ bearbeitet. Ziel war es, eine umformgerechte Schmiedeanfangsform zu gießen und diese anschließend zum endkonturnahen KUT umzuformen. Aus energetischer Sicht, als auch in Hinblick auf den Materialverbrauch, begannen die Arbeiten an skalierten Demonstratorbauteilen, die alle wesentlichen Geometrielemente des Großkolbens aufwiesen. Die Herausforderung bestand darin, die Geometrien so zu entwickeln, dass sie den gießtechnischen Anforderungen entsprechen als auch später im wiedererwärmten Zustand ins Schmiedegeßen eingelegt werden können. Die Verknüpfung von Guss- und Umformsimulation waren Kern der Prozessauslegung und -Optimierung. Um dem Projektziel, ein „visionäres KUT“ herzustellen, bei dem schon bei der Gussteilherstellung Material gespart wird, gerecht zu werden, wurden Durchbrüche an Stellen, die für die Stabilität des Kolbens unkritisch sind, eingebracht. Die finale Ausbaustufe der Prozesskette beinhaltete die direkte Umformung der Gussteile aus der Gießhitze. Unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten

ist diese Verfahrensabfolge zu bevorzugen. Die Herausforderung besteht jedoch darin, ohne Speiser zu gießen, da dieser im heißen Zustand kaum vom Gusskörper getrennt werden kann.

In 10 ist die Abfolge der einzelnen Prozessstufen für die Herstellung des Leichtbau KUT dargestellt.

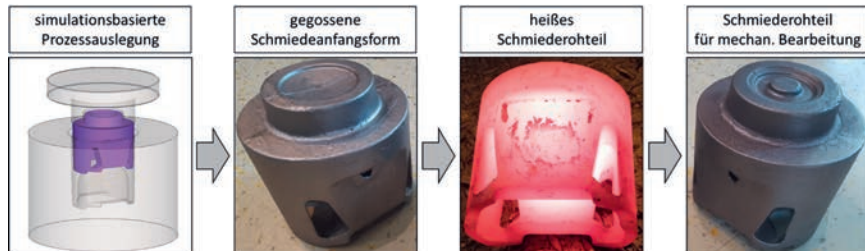


Abb.12: Prozessabfolge

Im vorletzten Schritt der Prozesskette erfolgte die stoffschlüssige Verbindung des entwickelten KOT mit dem KUT. Hierfür wurde eine neue Art des Reibschweißens (thermomechanisches Reibschweißen) entwickelt, welche durch eine vorgeschaltete Teilerwärmung die Prozesszeit und Prozesskraft deutlich reduzierte. Um die aufwendige Prozessdatenermittlung im Realversuch zu vermeiden, wurde die Temperaturverteilung mit finiten Elementen beschrieben und mit instationärer Wärmeleitung und der Finite-Differenzen-Methode berechnet. Nachdem bewiesen war, dass die numerische Auslegung des Prozesses erhebliches Potential aufweist und die neue Methode der partiellen Vorwärmung erfolgreich ist, wurde schlussendlich das KOT mit dem KUT, stoffschlüssig verbunden (Abbildung 16)



Abb.13: visionärer Leichtbaukolben mit einem Durchmesser 160 mm

Nach der finalen Wärmebehandlung des Gesamtkolbens wurde der Fokus auf die lokale Festigkeitssteigerung der Kolbenringnuten gelegt. Mittels Laserhärten nach der finalen mechanischen Bearbeitung konnten die Festigkeiten in den relevanten Bereichen deutlich gesteigert und trotzdem die engen Form- und Lagetoleranzen eingehalten werden.

Die hier vorgestellte Technologie stellt somit die Weichen für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Großkolbenfertigung.

Die werkstofftechnische Charakterisierung erfolgte mithilfe verschiedener etablierter und angepasster Methoden. Für die mechanische Prüfung wurden Scher- und Zugversuche sowie Härtemessungen durchgeführt. Die Scherversuche wurden vor allem zur Bestimmung

der Haftfestigkeit des Werkstoffverbundes der Kolbenoberseite mit und ohne Thermoschockbeanspruchung durchgeführt. Zugversuche und Härtemessungen erfolgten hauptsächlich im Zusammenhang mit der Entwicklung der Wärmebehandlungsstrategie für den gesamten Kolben sowie bei der Auswahl des Formstoffsystems bei den gegossenen Schmiedeanfangsformen. Die Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit erfolgten durch Salzsprühtests mit verschiedenen Salzen und bei unterschiedlichen Temperaturen. Zur Nachbildung realer Maschinenbedingungen wurden neben isothermer Versuchsführung auch zyklische Experimente durchgeführt.

Eine sich dem Schmiedeprozess anschließende Wärmebehandlung kann als unabdingbar angesehen werden, um durch den Abbau auftretender Eigenspannungen einen langfristigen Betrieb zu gewährleisten.

Die Charakterisierung der gegossenen Schmiedeanfangsformen erfolgte unter den Aspekten der Werkstoffauswahl, Gießverfahren und Formstoffsystem an gegossenen und warmgewalzten Keilproben.

Ziel der Arbeiten am Gießerei-Institut ist die Entwicklung einer Prozesstechnik zur Herstellung gegossener Schmiedevorformen aus den neu entwickelten Stahllegierungen MCG3 und MCG35. Diese Stahl Gussteile werden in einem anschließenden Arbeitsschritt zu Kolbenunterteilen umgeformt, was die Herstellung leichter und leistungsfähiger Bauteile ermöglicht. Ein wesentliches Teilziel der Untersuchungen besteht daher in der Ermittlung und Charakterisierung der bislang weitgehend unbekanntem gießtechnologischen Eigenschaften der neuen Legierung MCG3 und MCG35. Diese neue Stahllegierung unterscheidet sich hinsichtlich des Si-, Mn, und Cr- Gehaltes deutlich von der bekannten Basislegierung 42CrMo4. Neben experimentellen Untersuchungen werden diese Arbeiten intensiv mit Simulationen (Formfüllungs- und Erstarrungssimulation sowie Phasenfeldsimulation) unterstützt. Nach umfangreichen Laboruntersuchungen und praxisnaher gießtechnischer Erprobung der Legierungen im Vergleich zur Basislegierung 42CrMo4 soll letztlich eine Legierungsauswahl für die weiteren Untersuchungen erfolgen.

Insbesondere das Formfüllungsvermögen sowie Benetzungsverhalten, Liquidus- und Solidustemperatur sind wichtige Einflussgrößen sowohl zur gießgerechten Auslegung der Bauteilgeometrie als auch zur Gestaltung eines effektiven Gieß- und Anschnittsystems.



Abb. 14: Kolbenunterteil aus MCG35

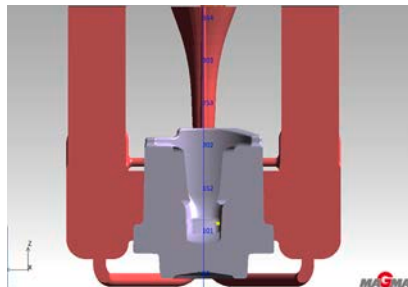


Abbildung 14: Gießsystem für Kolbenunterteil

Zusätzlich wurde für die neue Stahllegierung MCG35 das für eine erfolgreiche Wärmebehandlung erforderliche, aber bislang nicht verfügbare ZTU Diagramm entwickelt und experimentell an Gussteilen des Kolbenunterteils erfolgreich validiert.

#### Verwertungsplan

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1.	Markterweiterung durch neue Technologien bei hybriden Werkstoffverbunden Stahl- bzw. Gussgrundkörper in Verbindung mit Sonderwerkstoffen (Nimonic, Inconel, ...)	2 bis 3 Jahre
2	Anwendung des neuartigen durchgehend simulationsgestützten Dimensionierungsverfahrens für den thermomechanischen Hybridreibschweißprozess für Großmotorenkolben in extremer Leichtbauweise mit einer deutlichen Verbesserung der Produktparameter bei  Erhöhung der Langlebigkeit Reduzierung der Emission Verkürzung der Berechnungs- und Entwicklungszeiten Reduzierung der Fertigungszeit und -kosten	1 bis 2 Jahre
3.	Markterweiterung im Bereich der simulationsgestützten Dienstleistungen unter Anwendung der entwickelten Simulationsmethodik und -Werkzeuge bei der Berechnung und Auslegung von neuartigen Baugruppen bei der Vorhersage	1,5 Jahre
4	Nachweis der Prozesskette thermohybridreibschweißen mit Erwärmung, Reibschweißen mit reduzierten Drehzahlen, Kräften, Bauteilen bis Ø 450 mm unter industrienaher Fertigung	1 bis 2 Jahre
5	Schwerpunkte der Nutzung der Auslegungs-, Dimensionierungsverfahren und Fertigungstechnologie für Schiffsmotorenkolben mit hybriden Werkstoffkombinationen:  Kolbenentwicklung neuartiger reibgeschweißter Großmotorenkolben in unterschiedlichen Konstruktionsausführungen (schwer, leicht) Haltbarkeitsnachweise für thermomechanisch hybridreibgeschweißte Kolben und andere Bauteile Verbesserung der Zuverlässigkeit bei der Auslegung von Großmotorenkolben Verbesserung der Wirtschaftlichkeit	2 bis 3 Jahre

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Kernthema des Teilprojekts bestand in der Entwicklung dynamisch und thermisch hochbelastbarer Motorbauteile durch den Einsatz spezieller, hybrider Werkstoffverbunde, die den Anforderungen künftiger maritimer Großmotorengenerationen gerecht werden, wobei ökologische Belange im Vordergrund standen. In Auswertung der bisherigen Untersuchungen kann die Aussage getroffen werden, dass hybride Verbunde, bei Beachtung aller technologischen Prozessparameter beim Auftragsschweißen, der Erwärmungsstrategie vor der Umformung, beim Gießprozess, beim Schmiedeprozess selbst, sowie beim Thermohybridreibschweißprozess und der definierten Wärmenachbehandlung, entsprechend dem zukünftigen Anforderungsprofil für Bauteile in Großmotoren herstellbar sind. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass Simulationen ein vielseitiges Werkzeug zur grundlegenden Analyse der Verhältnisse im Verbund darstellen. So lassen sich Stellen kritischer Beanspruchung und Belastungen bestimmen und mögliche Versagensbereiche identifizieren. Mit Hilfe der entwickelten Simulationsmethoden konnten geeignete Strategien entwickelt werden, um den Umformprozess und den Reibschweißprozess von hybriden Werkstoffverbunden realitätsnah abbilden zu können. So können beispielsweise Aussagen der bekannten Werkstoffe über das Fließverhalten und der erzielten Umformgrade punktspezifisch getroffen werden. Die erfolgten Experimente korrelieren mit den Aussagen der Simulationen. Folglich kann durch eine numerische Abbildung des Prozesses bereits in der frühen Phase der Produktplanung und -entwicklung, eine gesicherte Aussage über den Prozessverlauf und die zu erwartenden Eigenschaften des Verbundbauteils getroffen werden. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde das Demonstrator Bauteil, der Kolbenboden mit dem Kolbenhemd mit dem neuartigen Thermohybridreibschweißverfahrens gefügt und fertigbearbeitet. Der Kolben wurde bezüglich seiner Eigenschaften in Langzeitversuchen auf verschiedenen Test- und Korrosionsprüfständen unter praxisrelevanten Einsatzbedingungen erfolgreich getestet.







# EHCR-BOOST –

KOMPAKT VERNETZTE MEHRPHASENTRANSPORTSYSTEME MIT NEUEN CASINGGAS KOMPRESSOREN ZUR ERHÖHUNG DER AUSFÖRDERRATE MARITIMER ÖL- UND GAS-FELDER

## AUTOREN

<b>MARK REICHWAGE</b>	ITT BORNEMANN GMBH, OBERNKIRCHEN
<b>JENS-UWE BRANDT</b>	ITT BRONEMANN GMBH, OBERNKIRCHEN
<b>DR. ABDULMALIK ALWAN</b>	INSTITUT FÜR ANGEWANDTE GEOWISSENSCHAFTEN, TU BERLIN
<b>MILAN PESCHKES</b>	ARBEITSGRUPPE BAUMASCHINEN- UND FÖRDERTECHNIK, RUHRUNIVERSITÄT, BOCHUM
<b>LUCAS BAUMEISTER</b>	ARBEITSGRUPPE BAUMASCHINEN- UND FÖRDERTECHNIK, RUHRUNIVERSITÄT, BOCHUM
<b>PROF. HANS HOFFMEISTER</b>	ISSV AN DER HELMUT-SCHMIDT-UNIVERSITÄT, HAMBURG
<b>PROF. ANDREA LUKE</b>	TECHNISCHE THERMODYNAMIK, UNIVERSITÄT KASSEL
<b>MARIAN LOTTIS</b>	TECHNISCHE THERMODYNAMIK, UNIVERSITÄT KASSEL
<b>MOHAMMAD DEEB</b>	TECHNISCHE THERMODYNAMIK, UNIVERSITÄT KASSEL

## EINLEITUNG

Der zunehmende Energiebedarf und das abzusehende Ende fossiler Energie-Ressourcen an Land erfordern zukünftig stärkere Anstrengungen bei der Erschließung von Gas- und Öl Vorkommen in schwer zugänglichen Gebieten im Meer, bis in Wassertiefen über 2000m hinaus. Mehrphasentransportnetzwerke zur bedarfsgerechten und umweltschonenden Öl- und Erdgasförderung im Meer und in rauen und eisbedeckten Seegebieten können dabei einen wesentlichen Beitrag leisten.

Aus geeigneten Erdöl-/Erdgas-Lagerstätten im Meer können Leitungsnetzwerke und in sie integrierte Mehrphasenpumpen das Gemisch aus Kohlenwasserstoffen, Lagerstättenwasser und Feststoffen mehrphasig (flüssige und gasförmige Phase) zu Verarbeitungsstationen auf See oder an Land transportieren.

Das EHCR-Boost (Enhanced Hydrocarbon Oil Recovery) System besteht aus Mehrphasen-downholepumpen, die die (im Wesentlichen) flüssigen Bestandteile des Förderproduktes im Steigrohr einer Förderbohrung zu Tage fördern, neuartigen Casinggas Kompressoren, die den Hauptteil des Begleitgases durch das Casingrohr der Bohrung abziehen sowie

nachgeschalteten Multiphasenboosterpumpen, mit denen das erforderliche Auslassdruckniveau zur Überwindung von Förderdistanzen erzielt wird. Das Abziehen des Begleitgases führt zu einer Druckabsenkung im Bohrloch und somit zu einem verbesserten Zufluss in die Bohrung. Die mehrstufige Verdichtung des Begleitgases verbessert den Gesamtwirkungsgrad der Anordnung.

## 2. CASINGGAS KOMPRESSOR

Für die Entwicklung des Casinggas Kompressors wurden rotodynamische und volumetrische Förderprinzipien hinsichtlich ihrer spezifischen Eigenschaften im vorgesehenen Anwendungsfeld analysiert und bewertet. Dies führte zur Wahl des Verdrängerprinzips, da damit wechselnde Betriebsbedingungen und Medienzusammensetzungen am besten zu bewältigen sind. Da in der Regel Kondensate, Formationswasser und Feststoffe das Förderprodukt begleiten, wird der Casinggas Kompressor als berührungsfrei laufende Schraubenmaschine vorgesehen.

Zur Verbesserung des Wirkungsgrades wurden verschiedene Profilvarianten untersucht, siehe Abb. 1.



Abb. 1: Profilvarianten  
asy-SRM (oben links) und sym-SRM (oben rechts) profilierte 2/4 gängige Schrauben  
sym-SRM profilierte 3/4 gängige Schrauben (unten links)  
LW-profilierter 1/2 gängige Schrauben (unten rechts)

Die Kennlinien der unterschiedlich profilierten Versuchsrotoren wurde mit der in Abb. 2 dargestellten einflutigen Versuchsmaschine ermittelt. Die Bauweise mit einseitiger Lagerung ermöglichte einen vereinfachten Wechsel der Prüflinge.

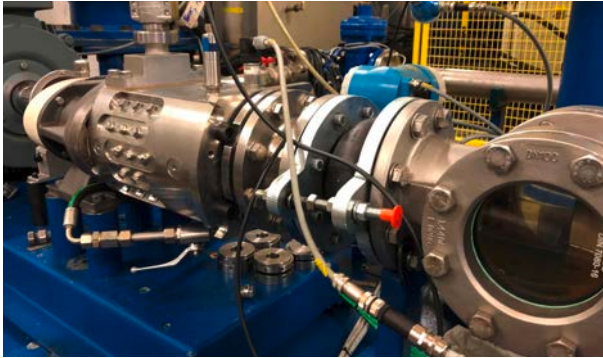


Abb. 2: einflutiger CGC zur Erprobung von Profilvarianten

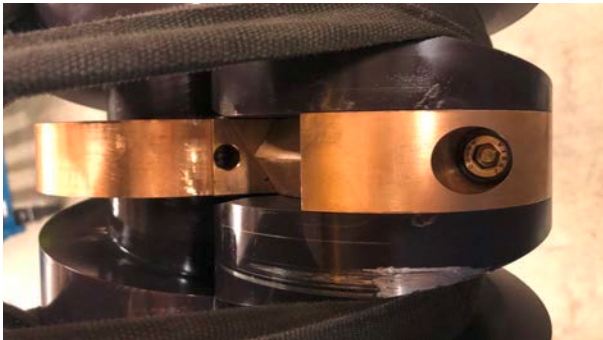


Abb. 3: doppelflutiger Rotorsatz mit QN-profilierten Förderschrauben und statischem (ortsfestem) Steuerschieber



Abb. 4: doppelflutiger Rotorsatz mit LW-profilierten Förderschrauben und rotierendem Steuerschieber

Die für eine energetisch vorteilhafte Gaskompression erforderliche polytrope Kompression wird durch den Einsatz eines druckseitig angeordneten Steuerschiebers erreicht. Dazu

wurden sowohl statische Ausführungen (Abb. 3) als auch rotierende Baumuster (Abb. 4) entwickelt und erprobt. Je nach Profilsteigung kann zur Bildung einer abgeschlossenen Förderkammer zusätzlich der Einsatz eines einlassseitigen Steuerschiebers erforderlich sein.

Zum Erzielen größerer Förderströme und zum Ausgleich der Axialkräfte wurde der Demonstrator des Casinggas Kompressors zweiflutig ausgeführt, Bild 5.

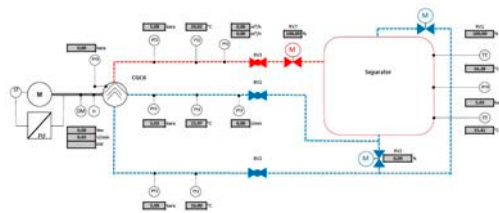


Abb. 5: Versuchsaufbau des zweiflutigen CGC-Demonstrators bei der Erprobung

### 3. FÖRERSYSTEM

Das EHCR-Boost System besteht aus drei aktiven Komponenten:

- > dem Multiphasen-Downholeaggregat, welches die flüssigen Bestandteile des Förderfluides, ggf. mit einigen Gasbeimengungen, zu Tage bringt
- > dem neuartigen Casinggas-Compressor (CGC), der über Tage installiert wird und die Hauptmenge des geförderten Gases über das Casingrohr von der Lagerstätte abzieht
- > dem Multiphasenpumpenaggregat, welches die flüssigen und die gasförmigen Anteile des Förderstromes in die Transport-Pipeline fördert und dazu den Druck auf das Niveau der Transportpipeline erhöht.

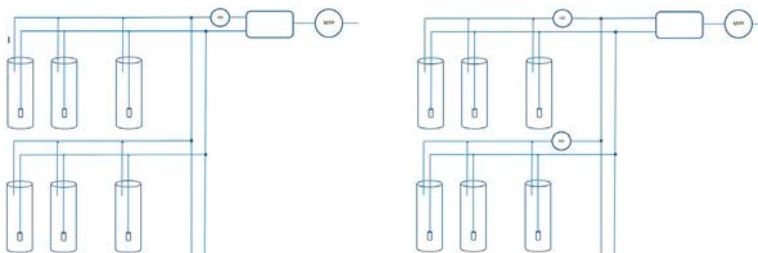


Abb. 6: EHCR-Boost Systeme für mehrere Bohrungscluster mit zentraler Casinggasverdichtung (links) und dezentraler Casinggasverdichtung (rechts)

Für die Ansteuerung des Fördersystems gilt:

- › die Höhe der Flüssigkeitssäule über dem MDA sinkt proportional mit der Drehzahl des MDA ab. Der Gasdruck im Annulus senkt die Säule zusätzlich ab.
- › der Gasdruck im Annulus hängt umgekehrt proportional vom Verhältnis von Gasförderung und maximaler Gaseinströmung und damit von der durch die CGC-Drehzahl dominierten Gasausförderung ab.
- › der Förderstrom der nachgeschalteten Multiphasenpumpe ist durch Drehzahlveränderung so einzustellen, dass die Förderrate der MPP den zuströmenden Volumina von MDA und CGC bei dem vorgesehenen Betriebsdruck des Sammelbehälters entspricht.

#### 4. LAGERSTÄTTENVERHALTEN

Hauptziel des Teilprojektes war die Untersuchung des Lagerstättenverhaltens von maritimen Öl- und Gasfeldern bei Einsatz von Mehrphasen EHCR-Boost Systemen unter besonderer Berücksichtigung der Kompression von Ringraumgas. Ein weiteres Ziel war, die Einsatzmöglichkeiten des Downhole-Pumpen-Aggregats MDA unter Einbeziehung des CGC und der Auswirkungen des kompakten Mehrphasen (MP) - Netzwerks im gesamten „reservoir-to-surface“ Fördersystem zu untersuchen (Abb. 7).

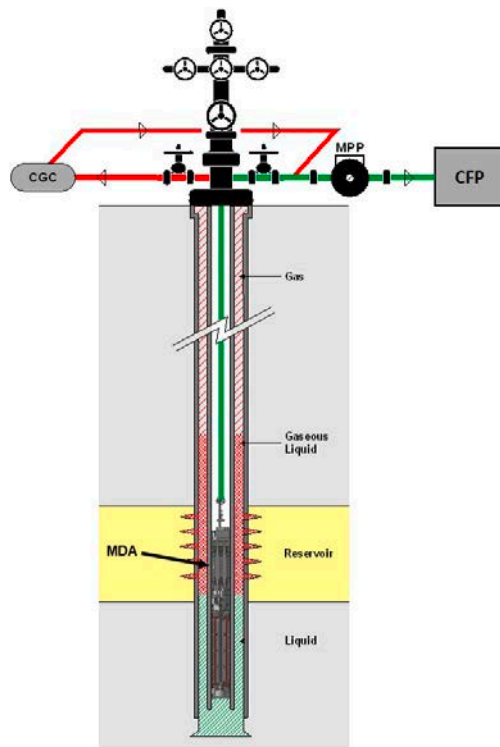


Abb. 7: Das integrierte Mehrphasen-Fördersystem vom Bohrloch bis zu den zentralen Produktionsanlagen (CPF); Bohrungsausbau mit Gasseparation an der Bohrlochsohle

Durch dynamische Simulation des Reservoirverhaltens wurden die spezifischen Einsatzbereiche der Einzelkomponenten und das gesamte Mehrphasen EHCR-Boost System vom Bohrloch bis in die Obertage-Anlagen untersucht und beschrieben, um einen effizienten Einsatz des EHCR-Systems zu definieren und Risiken bei der Förderung einschätzen zu können. Für die Reservoir Simulation und die Integration der Fördertechnik wurden an Projekt-Software neben ECLIPSE (Schlumberger) die Programme REVEAL, MBAL, PVTP, PROSPER, GAP und RESOLVE von Petroleum Experts (PETEX) eingesetzt.

Zunächst wurden generische Lagerstätten-Modelle (Abb. 8) erstellt, um die Reservoir Simulation bei Einsatz des MDA und des CGC im integrierten Mehrphasenfördersystem durchzuführen und das Förderverhalten von Einzelbohrungen sowie die Effekte auf das Lagerstättenverhalten und daraus abgeleitet, die Steigerung des Ausbeutegrades von Lagerstätten zu untersuchen.

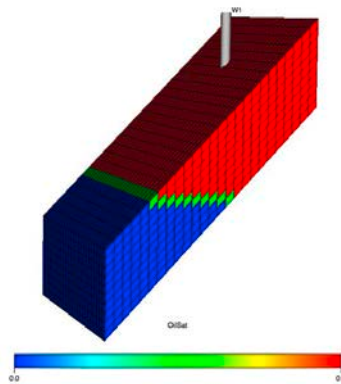


Abb. 8: Ölsättigung im generischen Reservoir-Modell einer Einzelbohrung (ECLIPSE-Software; Schlumberger)

In der integrierten Produktionsmodellierung (IPM) der Projekt-Software wurden die Einsatzmöglichkeiten des MDA und des CGC untersucht (Abb. 9).

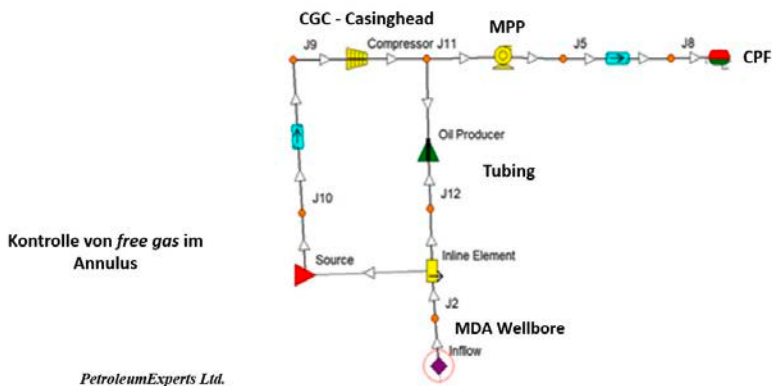


Abb. 9: Schema des „reservoir-to-surface“ Fördersystems im Integrierten Produktionsmodell IPM (Petroleum Experts)

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde die Bohrungsperformance unter Einbeziehung des MDA und des CGC in der Integrierten Produktionsmodellierung IPM durchgeführt. Die Lagerstätten-Modelle wurden auf verschiedene Teufenlagen, Shallow bei 800m, Intermediate bei 2.000m und Deep bei 3.000m Tiefe und die entsprechenden variablen Reservoir/Fluid Eigenschaften eingestellt ([1], [2], [3] und [4]). Die einzelnen Modelle wurden für den natürlichen Triebmechanismus und unterschiedliche Intensitäten im Wassertrieb simuliert, um die Einsatzmöglichkeit der EHCR- Systemkomponenten MDA und CGC zu ermitteln. Hierbei wurden auch die Einflüsse des spezifischen Lagerstättenverhaltens auf MDA und CGC identifiziert und beschrieben ([5], [6], [7] und [8]).

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die MDA- Anwendung in Öl-Bohrungen eine Verlängerung der Produktionszeit und eine Verbesserung des Öl-Ausbeutefaktors um bis zu 3% bzw. der Hydrocarbon-Gesamtausbeute der Lagerstätten um durchschnittlich 7% bedeutet. Der Einsatz des CGC bei Gas-Separation an der Bohrlochsohle und die Förderung über den Ringraum verbessern die MDA-Produktionsbedingungen deutlich durch die Reduzierung des freien Gases am MDA-Einlass (Abb. 10).

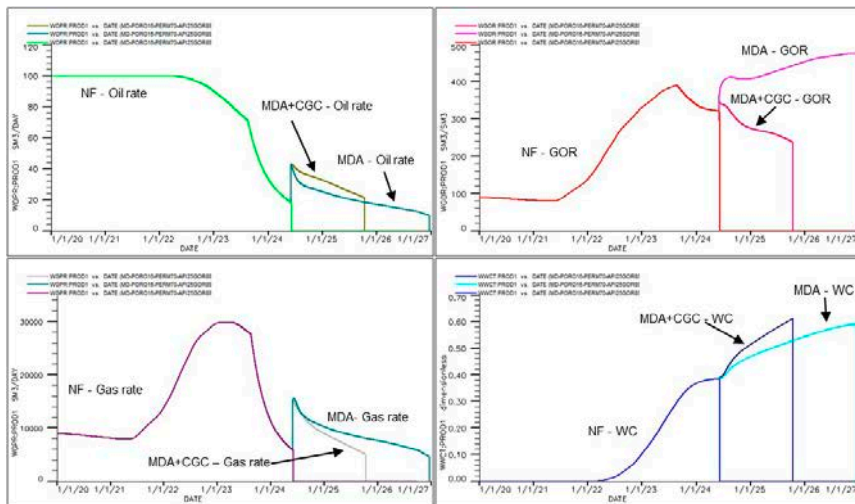


Abb. 10: Performance der Einzelbohrung im ECLIPSE Modell bezogen auf den Förderstrang. Simulationsergebnisse des Lagerstättenmodells; Reservoirtiefe 2.000m; natürliche Förderung mit moderatem Wassertrieb gegenüber Einsatz des vierstufigen-MDA und CGC

Die Untersuchungen der Einflüsse der transienten Bohrloch-Bedingungen GLR („gas-to-liquid-ratio“), GVF („gas-volume-fraction“), GOR („gas-to-oil-ratio“), BHP („bottomhole pressure“) und WC („water-cut“) auf die MDA und CGC Performance zeigen, dass das Lagerstättenverhalten über den gesamten Produktionszeitraum von entscheidender Bedeutung für die Auswahl und die Auslegung von geeigneten Downhole-Pumpen sind.

Die Simulationen des Förderprozesses ergaben, dass in gasreichen Bohrungen die Gas-Separation an der Bohrlochsohle und der kombinierte Einsatz von MDA und CGC grundsätzlich erforderlich sind.

Simulationen von Vertikalbohrungen in konventionellen und unkonventionellen Gas-Lagerstätten [9] ergaben, dass die Komponenten des Mehrphasen EHCR-Boost Systems zur Problembehandlung der Bohrungsverwässerung in der Endphase der Gasförderung eingesetzt werden können. Durch den Einsatz des MDA Aggregates wird eine deutlich höhere Förderrate für Gas und Wasser erzielt, die Produktionszeit verlängert und der Ausbeutefaktor für Gas um bis zu 4% erhöht (Abb. 11).

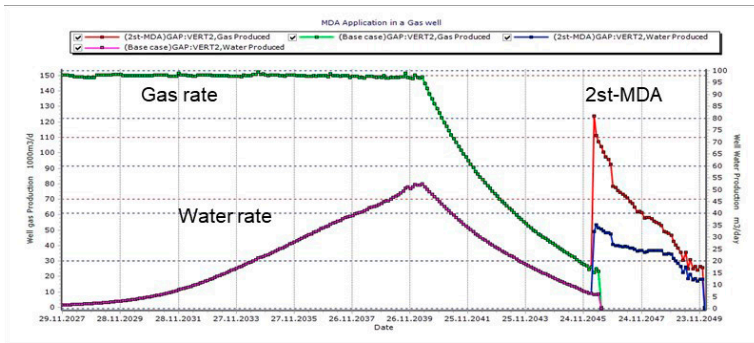


Abb. 11: Beispiel einer verwässerten Gasbohrung während der Endausförderung; natürliche Förderung; Wasserrate und Gas-Förderrate bei Einsatz des zweistufigen MDA

## 5. GRENZZUSTÄNDE UND BEWERTUNG DER BETRIEBSFESTIGKEIT

Im Rahmen des Ausbaus vernetzter Mehrphasen-Transportsysteme zu maritimen EHCR-Boost Systemen wird ein Casing-Gas Kompressor (CGC) als neuer Maschinentyp entwickelt und es ergeben sich verschärfte Betriebsbedingungen für Mehrphasen-Downhole-Aggregate (MDA) wobei der Einsatz von Hartmetall (WC-Co) u.a. durch die Verschleißbeständigkeit deutliche Lebensdauersteigerungen erwarten lässt. Eine wichtige Voraussetzung für die Erreichung der hohen Zuverlässigkeitsanforderung ist es, Methoden für eine rechnerische Festigkeitsbewertung zur Verfügung zu stellen.

Die Ziele des Vorhabens waren daher zum einen die Entwicklung einer anwendungsgerechten Berechnungsmethodik zur Festigkeitsbewertung von Komponenten aus Hartmetall (WC-Co) und zum anderen die Ermittlung auslegungsrelevanter Lastwirkungen und Grenzzustände des neuartigen Casing-Gas Kompressors.

Das Versagensverhalten von Hartmetallen unterscheidet sich deutlich von dem der Stahlwerkstoffe, sodass Methoden und Richtlinien aus diesem Bereich nicht übernommen werden konnten [10, 11] und auf Basis werkstoffspezifischer Versagensmodelle ein neues Nachweisschema entwickelt wurde. Der Kern des Schemas ist die rechnerische Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen (insb. der Förderschraube des MDA) ausgehend von verfügbaren Kenndaten (bspw. Bruchkraft laut Hersteller) auf Basis des Weakest-Link-Konzeptes und der zugehörigen Weibull-Statistik. Als maßgebliche Einflussgrößen wurden dazu zunächst das Effektive Volumen (bzw. die Effektive Oberfläche), die Oberflächenbearbeitung, Kerb- und Stützwirkungseffekte an Formkerben, Mittelspannung und die zyklische Ermüdung identifiziert.



Für den Werkstoff WC-Co (10 Gew.-% Co, Feinstkorn) wurden statische Bruchversuche und zyklische Versuche (Ermüdungsfestigkeit für einen Spannungshorizont) mit unterschiedlichen Probenarten durchgeführt, um einzelne Einflussgrößen zu betrachten (Einflussproben Hartmetall, EPH), siehe Abb. 12, bzw. eine Validierung durchzuführen (der Förderschraube angenäherte Differenzdruckprobe dpP). Die Versuche wurden mittels Festigkeitssimulationen und fraktografischen Untersuchungen einzeln ausgewertet sowie Kennwerte über statistische Verfahren abgeleitet.

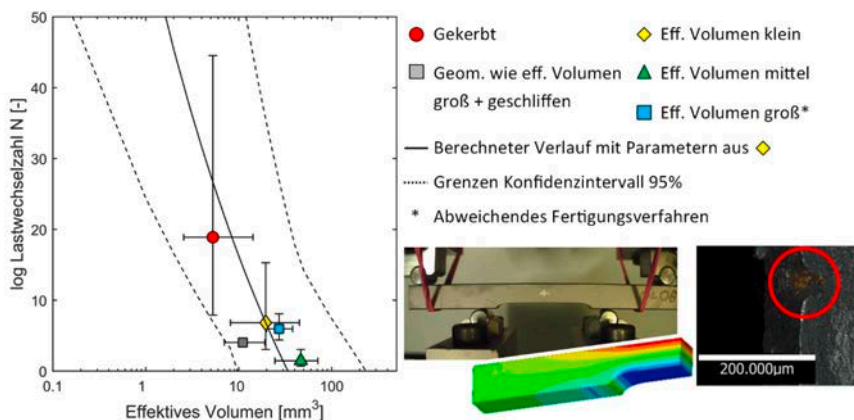


Abb. 12: Durchführung und Auswertung der zyklischen Vierpunkt-Biegeversuche mit EPH (Oberspannung= ca. 2300 [MPa]  $R=0,1$  Durchläufer ab  $10^7$  LW). Das Diagramm zeigt den rechnerischen Zusammenhang aus Eff. Volumen und erreichbarer Lastwechselzahl unter Nutzung der Parameter (Weibullmodul, Charakteristische logarithmische Lastwechselzahl) der EPH mit kleinem Eff. Volumen.

Auf der Basis wurden die Einflussgrößen quantifiziert und rechnerische Ansätze zur Berücksichtigung in der Festigkeitsbewertung parametrisiert und validiert. Insbesondere der Einfluss des Effektiven Volumens (bzw. Oberfläche) konnte für die statische Festigkeit bestätigt und erstmals auch für die zyklische Ermüdung nachgewiesen werden [12]. Eine Stützwirkung in Formkerben konnte nicht identifiziert werden, sodass eine Abbildung über das Effektive Volumen (bzw. Oberfläche) ausreichend erscheint.

Die abgeleiteten Einflussfaktoren sowie Erkenntnisse aus der Literatur wurden in einen makrogestützten Berechnungsablauf integriert, so dass eine Bauteilfestigkeitsbewertung in ANSYS® Mechanical weitestgehend automatisiert möglich ist.

Der neuartige CGC grenzt sich hinsichtlich der Beanspruchung (insb. in Form der Kompressionswärme [13]) und des Aufbaus (insb. Förderschraubendesign und zus. Mittenschieber) von bislang entwickelten Maschinen ab [14], sodass ein Nachweis der Zuverlässigkeit auf Basis verfügbarer Methoden und Ansätze nicht möglich ist. Vor dem Hintergrund wurden die Grenzzustände herausgearbeitet, die im Rahmen einer Nachweisführung zu berücksichtigen sind, maßgebliche Betriebszustände zur Definition der Lasteinwirkungen identifiziert und praxisorientierte Modelle zur Berechnung der Beanspruchungen entwickelt.

Zur Betrachtung der Grenzzustände wurde zunächst ein Grenzzustandslastenheft aufgebaut, das die Betriebszustände mit den Komponenten und möglichen Versagensszenarien verknüpft. Die dort aufgeführten potentiellen Grenzzustände wurden bewertet und maßgebliche weiter betrachtet. Ausgehend von dem durch ITTB erarbeiteten Konzept des CGC wurden zunehmend komplexere FEM-Simulationsmodelle und die zugehörigen Lastmodelle aufgebaut, um Temperatur- Verformungs- und Spannungsverteilungen sowie das Schwingungsverhalten in den Komponenten detailliert zu ermitteln. Anhand der Modelle konnten maßgebliche Betriebszustände zur Definition der Lasteinwirkungen identifiziert werden, sodass letztlich eine überschaubare Anzahl von Grenzzuständen und Betriebsbedingungen im Rahmen der Nachweisführung zu betrachten sind. Über Parametervariationen wurden die Erkenntnisse hinsichtlich anderer Baugrößen/Varianten abgesichert.

Ausgehend von den komplexen Simulationsmodellen wurden geeignete Modellierungstiefen für die Abbildung der Grenzzustände erarbeitet (bspw. 1D-Modelle zur Durchbiegung und Schwingungsberechnung in Anlehnung an [14, 15] oder entkoppelte thermisch-mechanische Simulationen), sodass praxisgerechte Modellansätze vorliegen. Die im Rahmen der Erprobung des CGC-Demonstrators durch ITTB erreichten Grenzzustände konnten durch die Berechnungen nachvollzogen werden, wodurch eine Abbildung dieser Grenzzustände validiert ist. Die Ergebnisse wurden zu einem methodischen Vorgehen zusammengefasst, sodass die fundierte Auslegung und Nachweisführung von CGC in der Praxis möglich ist.

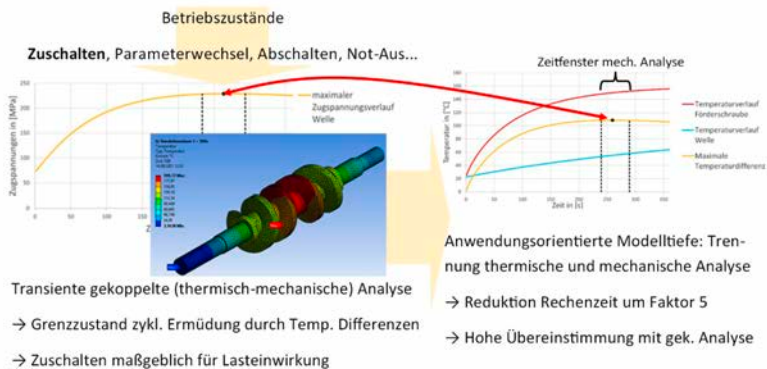


Abb. 13: Exemplarische Darstellung der Erarbeitung und Simulation des kritischen Grenzzustandes, dem Zuschalten des CGC, mithilfe von komplexen 3D-FEM Simulationsmodellen zur Ermittlung der Temperatur-, Verformungs-, und Spannungsverteilung, sowie der hieraus abgeleiteten anwendungsorientierten Modelltiefe

## 6. WERKSTOFF-SCHADENSMECHANISMEN

Ziel der Untersuchungen war die Aufklärung von Korrosionsschadensmechanismen durch aufkonzentrierte Salzlösungen beim Betrieb von neuartigen Erdöl-Begleitgas -Kompressoren. Dazu wurden elektrochemisch instrumentierte Slow Strain Rate (SSRT)-Versuche nach Abb. 14 bei freiem Korrosionspotential mit üblicherweise in Schraubenspindeln verwendeten Werkstoffen bei unterschiedlichen Salzlösungen und Temperaturen sowie

Sauerstoffgehalten durchgeführt. In anschließenden Modellrechnungen wurden die Ergebnisse erweitert und interpretiert.

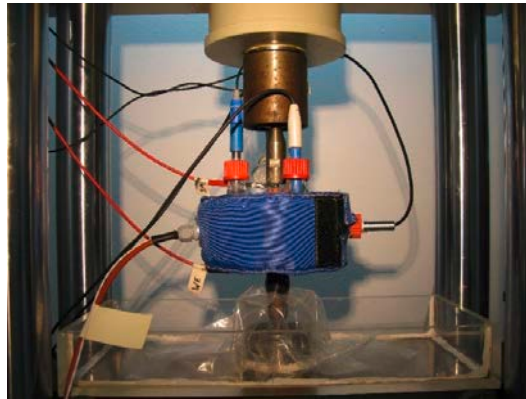


Abb. 14: Elektrochemische SSRT Versuchszelle mit Beheizung, Videoaufzeichnung der Probenoberfläche

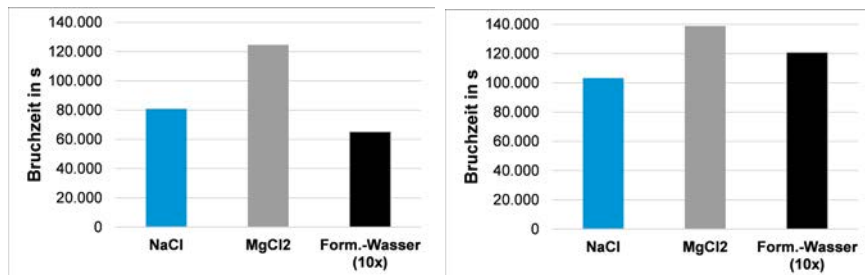


Abb. 15: SSRT- Bruchzeiten von 1.4057 (links) und 1.4542 (rechts) in gesättigter NaCl-, MgCl<sub>2</sub>- Lösung und Formationswasser bei 80°C an Luftatmosphäre

Im Ergebnis nimmt die Bruchzeit mit zunehmenden Temperaturen ab, erreicht aber für den Werkstoff 1.4542 bei 80°C in allen geprüften Medien höhere Werte als bei 1.4057. Betrieblich bedeutet dies eine höhere Bruchsicherheit des 1.4542 gegenüber dem 1.4057.

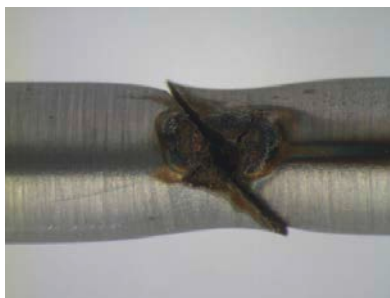


Abb. 16: Risseinleitung durch aktive (stabile) Lochkorrosion



Abb. 17: Metastabile Lochkorrosion ohne Rissbildung (100:1)

Im SSRT werden zwar bei allen Medien und Temperaturen sowie Werkstoffen deutlich niedrigere Bruchdehnungen als ohne Korrosionsbelastung erreicht, eine quantitative Zuordnung erscheint wegen der auf den Probenoberflächen aus Korrosionslöchern entstandenen zahlreichen Anrisse aber nicht möglich. Dieses Ergebnis weist auf den bei betrieblichen Schadensfällen vielfach dokumentierten Korrosionsmechanismus hin: die Lokalkorrosion kann nach Abb. 16 und 17 je nach elektrochemischen Bedingungen und mechanischer Beanspruchung sowohl zur aktiven Rissbildung (Abb. 16) führen, als auch bei geringeren lokalen Dehnungen (Abb. 17) und weniger aggressiven lokalen Medien im rissfreien und passiven Zustand verbleiben. Nähere Untersuchungen des Lochkorrosionsmechanismus zeigen lokale Absenkungen des pH-Werts nach Abb. 18, die thermodynamisch die lokale Entstehung von reduziertem Wasserstoff ermöglichen und damit zu einer lokalen Wasserstoffrissbildung im Fall der Abb. 16 führen können. Abb. 19 zeigt dazu die Entstehung einer Wasserstoffblase an einer Lochkorrosionsstelle.

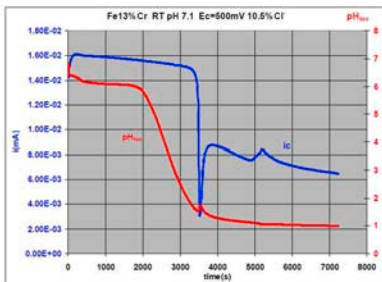


Abb. 18: Lokale pH-Änderung in einer Modellzelle

Abb. 19: Wasserstoffblasen an SSRT-Probe

Abb. 20 dokumentiert für eine Modellegierung mit 13%Cr die durch Modellrechnungen und experimentelle Verifikation ermittelte vom gelösten Sauerstoff und dem elektrochemischen Potential abhängige Entstehung ansäuernder, rissfördernder und passivierender metastabiler Lochkorrosion. Mit erhöhten Chloridgehalten wird das Gebiet der aktiven Lochkorrosion erweitert, was auf die nachteilige Wirkung höherer Salzgehalte hinweist.

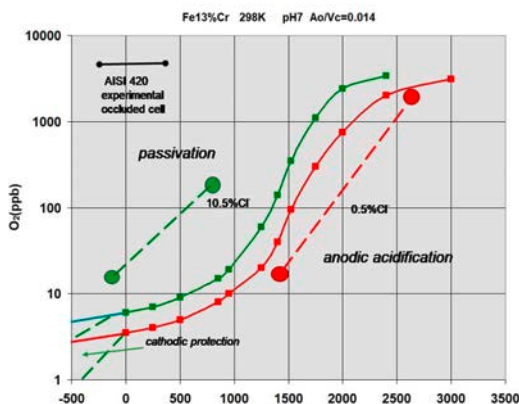


Abb. 20: Bedingungen für die Entstehung metastabiler (passivierender) und ansäuernder (aktiver) Lochkorrosion für einen 13% Cr-Stahl

Für den Werkstoff 1.4542 zeigt Abb. 21 den signifikanten Abfall der SSRT-Bruchdehnung ab einem Potential von 100 mV(Ag-AgCl) mit der Ausbildung wasserstofftypischer Bruchflächen und Rissausgang von lokaler Korrosion in Abb. 21.

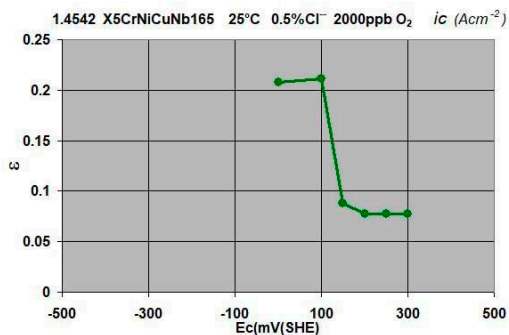


Abb. 21: Einfluss des angelegten Potentials auf die SSRT Bruchdehnung bei 0,5%Chlorid, 2000ppb O<sub>2</sub>, 25°C für AISI 630 (1.4542)

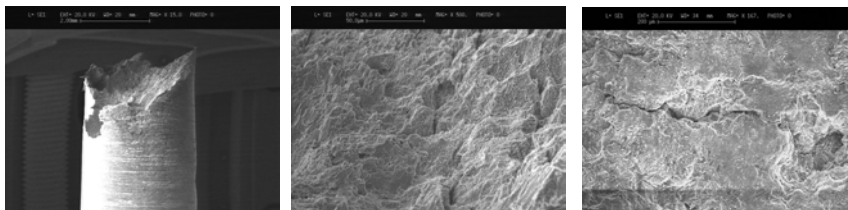


Abb. 22: Bruch und Bruchflächen der SSRT -Probe bei 0,5%Chlorid, 2000ppb O<sub>2</sub>, 25°C mit 250mV/Ag/AgCl und 10-6/s mit Rissbildung an lokaler Korrosionsstelle (Pfeil)

Der Schadensmechanismus der in Casing Gas Kompressoren zu verwendenden Werkstoffe unter der Einwirkung aufkonzentrierter Salzlösungen manifestiert sich in zwei Stufen:

1. der Ausbildung lokaler Lochkorrosionsstellen als mechanischer Kerben mit entweder
  - 1.1 inertem Lochmedium bei hohen Sauerstoffgehalten und niedrigen Potentialen oder
  - 1.2 aktivem Lochmedium mit lokaler Ansäuerung bei niedrigen Sauerstoffgehalten und höheren Potentialen.
2. der Einleitung von wasserstoffunterstützten Rissen im Falle 1.2 mit nachfolgendem möglichem Totalversagen.

Der Werkstoff 1.4542 weist dabei die höhere Beständigkeit gegenüber dem 1.4057 auf. Untersuchungen weiterer Werkstoffe müssen diesen Mechanismus berücksichtigen. Es

eröffnet sich die Möglichkeit, die Eigenschaften im Betrieb beobachteter Korrosionslöcher durch geeignete metallografische Prüfungen nach Fall 1.1. und 1.2. zu identifizieren.

## 7. THERMO- UND FLUIDDYNAMISCHE UNTERSUCHUNGEN

Im Inneren dieses Kompressors dichtet Flüssigkeit in einem Spalt die Förderkammern ab. Dabei treten Verlustströme des Prozessfluides entgegengesetzt zur Förderrichtung auf [16] [17]. Diese Verlustströme sind von dem Differenzdruck und vom Gasgehalt, bzw. den Stoffeigenschaften abhängig. Hohe Gasgehalte führen durch die niedrigere „mittlere Viskosität“ des Gemisches zu hohen Verlustströmen. Der Casing Gas Kompressor unterscheidet sich von herkömmlichen Gaskompressoren durch eine externe Zufuhr von flüssigem Prozessfluid, sodass sehr hohe Gasgehalte gefördert werden können. In diesem Falle wird das flüssige geförderte Fluid druckseitig getrennt und zurück in die Förderkammern des Casing Gas Kompressors gespritzt. Der Einfluss der Prozessfluidzufuhr auf die Thermo- und Fluidodynamik des Casing Gas Kompressors wird experimentell unter Berücksichtigung vieler Parameter wie der Einspritzposition (Saugseite und Druckseite) und des Einspritzvolumenstroms untersucht.

Zunächst werden Experimente an einem transparenten Kammermodell durchgeführt, das eine einzelne Förderkammer im Labormaßstab darstellt, siehe Abb. 23. In diesem wird sichtbar, dass es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Einspritzposition und Einspritzanzahl (einseitig und dreiseitig) auf das Abdichtverhalten im Inneren gibt. Die beste Spaltabdichtung wird im Falle der drei seitigen Prozessfluidzufuhr erzielt, da die Flüssigkeit entlang des Umfangsspalts gleichmäßig verteilt wird [18]. Die seitliche Einspritzung führt in den Experimenten zu der niedrigsten Verbesserung der Abdichtung. Durch die Schwerkraft sammelt sich Resflüssigkeit am Boden, die durch die Interaktion zwischen rotierenden Scheiben und dem zugeführten Flüssigkeitsstrahl im Falle der seitlichen Einspritzung zu Turbulenzen führt. Dies verschlechtert die Spaltabdichtung im oberen Bereich der Scheiben.

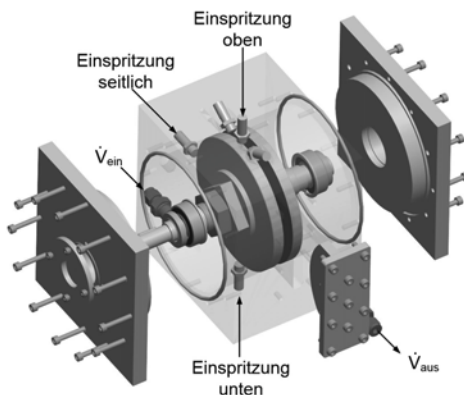


Abb. 23: 3D-Ansicht des Förderkammermodells mit Kennzeichnung der Einspritzpositionen

Anhand der Experimente im Labormaßstab wird die Prozessfluidzufuhr des realen Casing Gas Kompressors im Technikumsmaßstab ausgelegt und geplant, s. Abb. 24 (links). Im Inneren des Casing Gas Kompressors befindet sich eine Vielzahl an Temperatur- und Drucksensoren, vergl. Abb. 24 (rechts), die das Temperatur- und Druckfeld während des mehrphasigen Verdichtungsprozesses quantitativ darstellen. Der geförderte zweiphasige Volumenstrom wird um bis zu 40% unter Verwendung der saugseitigen Prozessfluidzufuhr und sogar um bis zu 45% unter Verwendung der druckseitigen Einspritzung verbessert. Dies wird durch die lokalen Drucksensoren im Inneren der Förderkammer bestätigt. Für die saugseitige Einspritzung dichtet die zusätzliche Flüssigkeit die letzte Förderkammer um 0,3 bar und für die druckseitige Prozessfluidzufuhr sogar um bis zu 0,65 bar besser ab, als im Falle der Referenzmessung ohne Einspritzung.

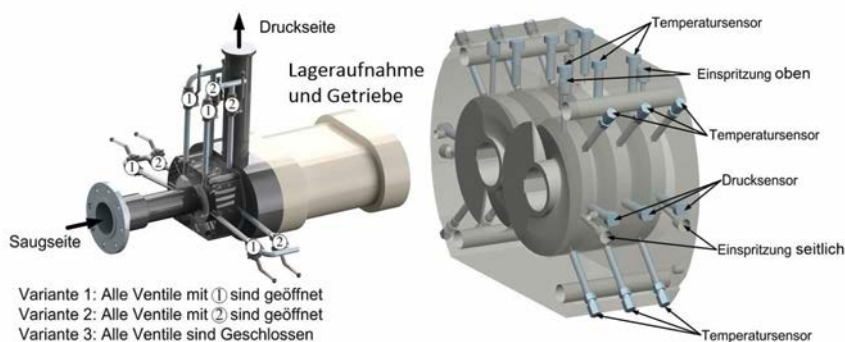


Abb. 24: 3D-Ansicht des Casing Gas Kompressors mit Kennzeichnung der Einspritzpositionen (links) und 3D-Ansicht des Gehäuses inklusive eingebauter Messtechnik (rechts).

Zum Erzielen hoher Druckdifferenzen werden in einem anderen Teil der Versuchsanlage in Reihe geschaltete Mehrphasenpumpen mit hydraulischer Antriebseinheit experimentell untersucht. Die sonst sehr starren Förderkennlinien der Verdrängermaschinen (Mehrphasenpumpen) werden durch den hydraulischen Antrieb variabel gestaltet. Die Ergebnisse für zwei in Reihe geschaltete Mehrphasenpumpen sind in Abb. 25 dargestellt und bestätigen die in [19] beschriebenen Vorteile der gemeinsamen Antriebseinheit. Die Kopplung zwischen den Antrieben bewirkt, dass sich die Mehrphasenpumpen selbst unter stark transienten Lastwechseln (hier Druckstoß mit Luft vor Pumpe 1) sofort gegenseitig beeinflussen. Dies impliziert eine selbstständige Drehzahländerung der Pumpen entsprechend des jeweiligen Lastzustandes.

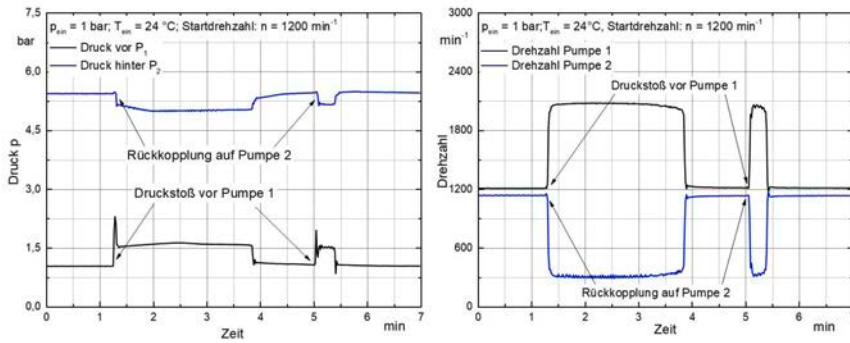


Abb. 25: Auswirkung von Druckstößen (links) auf die Drehzahlen (rechts) von zwei in Reihe geschalteten Mehrphasenpumpen mit gekoppelter Antriebseinheit

## ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde ein neuartiger Casinggas Kompressors entwickelt, bei dem das Volumen der Förderkammern dem veränderten Volumen des geförderten Gasstroms kontinuierlich angepasst wird und dessen Förderkammern durch den Flüssigkeitsanteil des Förderproduktes abgedichtet werden. Für die Entwicklung des System-Knowhow und insbesondere die Entwicklung von Betriebsszenarien zur Erhöhung der Ausförderrate wurden die Abhängigkeiten zwischen der Multiphasen Boosterpumpe, dem Casinggas Kompressor und den mehrstufig gekoppelten Multiphasendownholeaggregaten untersucht.

Das Verhalten von Öl- und Gaslagerstätten wurde unter Berücksichtigung der Kompression von Ringraumgas untersucht. Dazu wurden Lagerstättenmodelle entwickelt zur Untersuchung einer effizienten Nutzung von EHCR-Boost Systemen.

Die Grenzzustände der Komponenten des Fördersystems und deren Bewertung hinsichtlich Betriebsfestigkeit und Zuverlässigkeit wurden ermittelt. Dazu wurden die Lastszenarien für die wesentlichen Komponenten des Casinggas Kompressors identifiziert und die Bauteilbelastungen mit der jeweiligen Belastbarkeit verglichen.

Die korrosive Wirkung von kondensierenden und verdampfenden Salzlösungen wurde erforscht und damit die Werkstoffauswahl der Systemkomponenten und insbesondere der Casinggas Kompressorkomponenten abgesichert.

Für die Bereitstellung der thermo- und fluiddynamischen Berechnungsgrundlagen der neuartigen Casinggas Kompressoren in Mehrphasen Transportnetzwerken wurden die Kammerabdichtung und in Serie geschaltete hydraulisch gekoppelte Multiphasenpumpen systematisch untersucht.

## DANKSAGUNG

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



## LITERATUR

- [1] Oliva, G. B. F. F., Galvão, H. L. C., dos Santos, D. P., et al.: Gas Effect in Electrical-Submersible-Pump-System Stage-by-Stage Analysis, Society of Petroleum Engineers (SPE) Paper Number SPE-173969-PA, Journal SPE Production & Operations, SPE Production & Operations 32 (03): 294 – 304, 2017
- [2] Timur, A.: Effective Porosity and Permeability of Sandstones investigated through NMR Principles. SPWLA, 10th Ann. Log. Symp. Trans. 1968
- [3] Morris, R.L., Biggs, W.P.: Using Log-derived Values of Water Saturation and Porosity. SPWLA, 8th Ann. Log. Symp. Trans. 1967
- [4] Wyllie, M.R.J., Rose, W.D.: Some theoretical Considerations Related to the Quantitative Evaluation of Physical Characteristics of Reservoir Rock from Electrical Log Data. Trans. AIME, 189, 1973
- [5] Cooper P., Schiavello B.: Tutorial on multiphase gas-liquid pumping, Proceedings of the thirteenth International pump users symposium. - Houston, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University System pp.159-174, 1997
- [6] Brandt, J. U., Lewerenz, J., Müller-Link, D., Reichwage, M.: Development of a Multiphase Downhole Twin-screw Pump and its Use in Multiphase-operated Transport Networks, Article in Oil Gas European Magazine, 41(3):153-156, September 2015
- [7] Alwan, A. A., Dominik, W. R., & Lewerenz, J.: Numerical Simulations on the Applicability of Multiphase Down-Hole Twin-Screw Pumps MDA in Offshore Oil production, Society of Petroleum Engineers, SPE paper 183317-MS, 2016
- [8] Nicholson, et al.: Downhole Gas Separation in a High-GLR CO2 Application, SPE-194396-MS, 2019
- [9] Reitenbach, V.: Laboratory measurements of fluid transport properties on tight gas sandstones and applications, European Geosciences Union General Assembly, 2014
- [10] Scholten, J., et al.: „Verbundprojekt: MPNet - Maritime Multiphasentransportnetzwerke - Fördertechnologie zum bedarfsgerechten Transport von Mehrphasengemischen, Vorhaben: Festigkeitsbewertung ausgewählter Komponenten vernetzter Mehrphasen-Transportsysteme bei Verwendung alternativer Werkstoffe.“ techreport. Ruhr-Universität Bochum, AG Baumaschinen- und Förder-technik, Jan. 2017. <<https://doi.org/10.2314/GBV:1014401968>>.
- [11] Schedler, W.: "Hartmetall Für Den Praktiker: Aufbau." Herstellung, Eigenschaften Und Industrielle Anwendungen Einer Modernen Werkstoffgruppe, VDI-Verlag, 1988
- [12] Peschkes, M., et al. "Mechanical strength and fatigue lifetime of WC-Co cemented carbide in relation to the effectively loaded volume and surface", Int. J. Ref. Met. Hard Mater. 101, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105658>.
- [13] Gao, T., et. al.: Temperature and thermodynamic deformation analysis of the rotors on a twin screw multiphase pump with high gas volume fractions. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A 12 (2011), 9, S. 720–730, 2011

- [14] Wiedemann, T.: Systemanalytische Betrachtung von Rotoren von Mehrphasen-Schraubenspindelpumpen. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes Product and Service Engineering, Ruhr-Universität Bochum, 2009
- [15] Hamelberg, F. W.: Läuferkräfte bei Schraubenspumpen. Dissertation, Kleinoffsetdruckerei K. Urlaub Bamberg, Technische Hochschule Hannover, 1966
- [16] Wincek, M.: Zur Berechnung des Förderverhaltens von Schraubenspindel-pumpe bei der Förderung von Flüssigkeits-Gas-Gemischen; Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 1992
- [17] Körner, H.: Zum Förderverhalten von Schraubenspindelpumpen für Zweiphasen-gemische hohen Gasgehalts, Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 1998
- [18] Lottis, M., M. Deeb, A. Luke: Experimentelle Untersuchung zur Mehrphasen-strömung in öleingespritzten Mehrphasenschraubenspindelpumpen; Chemie-Ingenieurtechnik 92 No. 5 (2020), 619 - 623
- [19] Brandt J.-U., J. Lewerenz, M. Reichwage, A. Alwan, M. Peschkes, J. Danker, A. Luke, M. Mehlich, C. Münster, H. Hoffmeister: MPNET- Maritime Multi-phasentransportnetzwerke – Fördertechnologie zum bedarfsgerechten Transport von Mehrphasengemischen, Proc. Statustagung Maritime Technologien, Berlin, 2018, 169-192

# ACTRESS –

ARCHITECTURE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT PLATFORM FOR REALTIME SAFE AND SECURE SYSTEMS

## AUTOREN

<b>AXEL HAHN, ANDRÉ BOLLES, ARNOLD AKKERMANN</b>	OFFIS
<b>ALEXANDER STAVENHAGEN, PETER DUGGE, BENJAMIN LEHMANN, BENJAMIN LEIPOLD</b>	ATLAS ELEKTRONIK
<b>WILKO BRUHN</b>	RAYTHEON ANSCHÜTZ
<b>WIGAND GRAFE</b>	DNV
<b>CLAUS-HENNING FRIEDRICHS, JAN BARNICKEL</b>	AVL SOFTWARE AND FUNCTIONS
<b>DOREEN THOMA, DANIEL MEYSZIES, KARL-HEINZ WARNSTEDT</b>	BUNDESAMT FÜR SCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE
<b>MARTIN ULMKE, MARTINA BRÖTJE, CHRISTIAN HEMMINGHAUS</b>	FRAUNHOFER FKIE

## MOTIVATION

Hochautomation und Vernetzung sind Innovationstreiber in vielen Branchen. Auch der maritime Bereich profitiert von immer weiter verbesserten nautischen Assistenzsystemen, der Verfügbarkeit immer größer werdender Datenmengen und der Möglichkeit, Funktionen in maritimen Systemen über Software immer auf dem aktuellen Stand zu halten oder sogar zu erweitern.

Insbesondere die Tatsache, dass hochautomatisierte Systeme in ihrem Verhalten aber auch in ihrem Systemkontext deutlich weiter gefasst werden, als wir es von klassischen Systemen in der Vergangenheit kennen, führt dazu, dass neue Engineering-Kompetenzen aufgebaut werden müssen. Die Komplexität nicht abgeschlossener Einsatzbereiche, die Herausforderungen durch die Vernetzung der Systeme, aber auch die immer größer werdenden Fähigkeiten hochautomatisierter sowie autonomer Systeme, sogar in sicherheitskritischen Anwendungen eigenständig Entscheidungen zu treffen, erfordern Unterstützung über alle Phasen der Entwicklung, Zulassung und des Betriebs entsprechender Systeme, damit ihre Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit kontinuierlich gewährleistet werden kann.

Im Projekt ACTRESS wurde eine Technologienentwicklungsplattform (TEP) erstellt, welche die Entwicklung und Zulassung hochautomatisierter und autonomer maritimer Systeme unter-

stützt und dadurch einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen maritimen Industrie leistet.

Die Technologieentwicklungsplattform mit ihren Methoden und Werkzeugen wurde im Rahmen des Projektes anhand dreier Anwendungsfälle evaluiert, die von unterschiedlichen Anforderungen an echtzeitfähige und sicherheitskritische Systemverbünde abgeleitet wurden.

## 2. ACTRESS TECHNOLOGIEENTWICKLUNGSPLATTFORM UND V&V METHODEN

Hochautomatisierte und autonome maritime Systeme oder Systemverbünde besitzen die Eigenschaft, dass sich ihr Verhalten sowie der Systemkontext bzw. ihr Einsatzgebiet während der Systementwicklung nicht vollständig spezifizieren lässt. Somit erschwert sich die Entwicklung und Zulassung entsprechender Systeme hierbei deutlich im Vergleich zu abgeschlossenen Systemkontexten. Die Automobilbranche beispielsweise steht derzeit vor der Herausforderung, den Nachweis extra-funktionaler Eigenschaften wie die Sicherheit hochautomatisierter Fahrfunktionen zu erbringen. Verfahren der szenarienbasierten/datengetriebenen Verifikation und Validierung sollen hier Abhilfe schaffen, sind jedoch aktuell noch nicht vollständig ausgereift. Ähnlich stellt sich die Lage im maritimen Bereich dar, in dem ebenfalls zunehmend über hochautomatisierte und autonome Systeme nachgedacht wird, die entsprechender Zulassungsverfahren bedürfen. Ähnlich dem Automotive-Bereich wird sich hier zukünftig ebenfalls die Herausforderung ergeben, dass eine Kombination aus rein virtuellen Entwicklungs- und Erprobungsverfahren zusammen mit Hardware-in-the-Loop- und physischen Verfahren notwendig sein wird, um neuartige autonome maritime Systeme einsetzen zu können.

Mit der in ACTRESS entwickelten maritimen Technologieentwicklungsplattform wird das Ziel verfolgt, diesen Prozess zu unterstützen und Möglichkeiten für die Entwicklung und Erprobung hochautomatisierter und autonomer maritimer Systeme und Systemverbünde zu schaffen.

Anders als existierende Testfelder, die zum Beispiel in den Projekten/Vorhaben in der Nordsee (ACCSEAS<sup>1</sup>), der Ostsee (EfficienSea I +II<sup>2</sup>, Mona Lisa I<sup>2</sup>+II<sup>3</sup>, STM Validation<sup>4</sup>), dem Ionischen Meer (IONO<sup>5</sup>), der Adria (ARIADNA<sup>6</sup>), der Straße von Malakka (SESAME-Project)<sup>7</sup>, Japan (SSAP)<sup>8</sup> und Korea (SmartNavigation) umgesetzt wurden, soll die ACTRESS-TEP nicht nur eine Ausführungsumgebung für konkrete Systeme sein, sondern so generisch aufgebaut sein, dass unterschiedlichste maritime Systeme mit ihr entwickelt und erprobt werden können.

<sup>1</sup> <https://www.iala-aism.org/technical/e-nav-testbeds/accseas/>, zuletzt besucht 16.9.2021

<sup>2</sup> <http://www.efficiensea.org/>, zuletzt besucht 16.9.2021

<sup>3</sup> <https://www.iala-aism.org/technical/e-nav-testbeds/efficiensea-2/>, zuletzt besucht 16.9.2021

<sup>4</sup> <https://www.seatraficmanagement.info/projects/>, zuletzt besucht 16.9.2021

<sup>5</sup> <https://www.iala-aism.org/technical/e-nav-testbeds/iono/>, zuletzt besucht 16.9.2021

<sup>6</sup> <https://www.iala-aism.org/technical/e-nav-testbeds/ariadna/>, zuletzt besucht 16.9.2021

<sup>7</sup> <http://straits-stms.com/Project.html>, zuletzt besucht: 16.9.2021

<sup>8</sup> <https://www.jsmea.or.jp/ssap/>, zuletzt besucht: 16.9.2021

Die innerhalb des Projektes ACTRESS entwickelte Technologieentwicklungsplattform folgt den Konzepten zu Testfeldern aus der Automobilindustrie wie dem „Testfeld Niedersachsen“. Sie setzt auf einen durchgängigen Entwicklungs- und Zulassungsprozess von vollständig virtuellen Entwicklungs-, Verifikations- und Validierungskomponenten, über Ansätze, einzelne Komponenten als reale Hardware einzubringen, bis hin zu vollständigen Erprobung in Feldversuchen, zum Beispiel in der Umgebung des Jade-Weser-Ports in Wilhelmshaven. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Architektur der ACTRESS-TEP als Vorschlag aus dem Projektantrag und ihre Umsetzung im Zuge der Projektdurchführung. Die TEP steht heute im Rahmen der eMaritime Integrated Reference Platform (eMIR, [www.emaritime.de](http://www.emaritime.de)) allen interessierten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen zur Nutzung zur Verfügung. Sie enthält die dargestellten Komponenten und Dienste, die für die Bearbeitung unterschiedlichster Fragestellungen der Entwicklung und Erprobung hochautomatisierter, komplexer maritimer Systemverbünde genutzt werden können.



Abb. 1: Projektarchitektur von ACTRESS

## 2.1. PHYSISCHE KOMPONENTEN

Die ACTRESS-TEP enthält zahlreiche Komponenten, die teilweise mobil und teilweise fest an verschiedenen Standorten installiert sind. Alle können für unterschiedlichste Erprobungen unter realen Bedingungen genutzt werden.

**See-Container:** Im Rahmen des Projektes dienen zwei Seecontainer (10' und 20'), die mit Rechner- und Kommunikationsinfrastruktur ausgestattet sind, als zentrale Komponenten der ACTRESS-TEP. Die Container besitzen rundum Fenster und sind klimatisiert. Sie sind so aufgebaut, dass ein Transport per Kran und LKW sowie die Mitnahme auf Schiffen möglich ist. Die Container können somit sowohl als landbasierte Stationen im Testbetrieb als auch als seeseitige Komponenten beispielsweise zum Aufbau zusätzlicher Navigationsinfrastruktur für die Erprobung neuer seeseitiger Navigationssysteme genutzt werden. Weiterhin bieten die Container die Möglichkeiten, zum einen eigene Komponenten im Inneren zu erproben sowie zum anderen externe Sensorik auf dem Containerdach anzubringen und zu nutzen. So wird ein möglichst breites Anwendungsfeld durch die Container abgedeckt.



Abb. 2: See-Container (v. l. n. r.: Außenansicht des 20'-Containers; Innenansicht mit mobilen Simulatoreinheiten; 10'-Container während einer Erprobungsfahrt auf dem Schiff „Deneb“)

Sensorik: Weitere wichtige Bestandteile der ACTRESS-TEP sind unterschiedliche Sensor-komponenten, die für verschiedene Anwendungsfälle genutzt werden können. Es sind in der ACTRESS-TEP verschiedene Radargeräte verfügbar, die entweder stationär im Betrieb (s. Referenzwasserstraße) oder mobil im jeweiligen Einsatzgebiet genutzt werden können. Weiterhin steht auf der ATAIR des BSH ein MODAR-System der Firma OptoPrecision zur Verfügung, das insbesondere für die Erprobung hochautomatisierter Fahrfunktionen oder beispielsweise für die Erprobung von hochautomatisierten Search and Rescue Systemen eingesetzt werden kann. Auch die Erprobung neuartiger Systeme mit Komponenten der künstlichen Intelligenz, die auf die Erfassung optischer Daten ausgerichtet sind, wird mit diesem System ermöglicht. Darüber hinaus dient ein Laserscanner mit einer Reichweite von 2500 m und einer Stabilisierungsplattform für den Einsatz auf Schiffen der Entwicklung und Erprobung von Systemen unter Verwendung optischer Ranging-Technologien. Auch ein geographisches Mapping zur Erzeugung hochgenauer Karten, die oft für hochautomatisierte Anwendungen benötigt werden, wird durch diesen Laserscanner unterstützt. Neben diesen speziellen Sensoren stehen weitere Sensoren wie DGPS, IMUs, etc. in den Containern und auch mobil zur Verfügung.



Abb. 3: Stationäres Radargerät in Brunsbüttel



Abb. 4: MODAR-System, hier auf dem Dach des BSH in Hamburg installiert



Abb. 5: Der mobil einsetzbare Laserscanner unterstützt bei Hafenmanövern, hier in Wilhelmshaven.



Abb. 6: Die Kamera unterhalb der Radarantenne, hier in Cuxhaven.

Kommunikationseinrichtungen: Da die Nutzung der TEP typischerweise mobil an unterschiedlichen Orten meist ohne Festnetzkommunikationsinfrastruktur erfolgt, sind verschiedene Kommunikationsmöglichkeiten vorhanden. Es stehen drei V-Sat Satellitenkommunikationsantennen für die Nutzung insbesondere an Bord von Schiffen bzw. an Orten ohne Mobilfunkanbindung zur Verfügung. Außerdem können LTE-Modems mit externen Antennen für terrestrische Breitbandkommunikation genutzt werden.

Forschungsboot: Mit der „Josephine“ steht ein Forschungsboot für Testfahrten in der Deutschen Bucht und der Ostsee zur Verfügung. Dieses Boot ist trailerbar und kann daher flexibel zu diversen Einsatzorten transportiert werden. Die „Josephine“ ist mit einer Steer-by-Wire Einrichtung ausgestattet, die eine Fernsteuerung von Land oder auch die reale Erprobung hochautomatisierter Fahrfunktionen ermöglicht. Über einen LTE-basierten Kommunikationskanal wird eine Datenverbindung zwischen landbasierten Einrichtungen, zum Beispiel den Containern, und den nachfolgend dargestellten virtuellen Komponenten der TEP hergestellt, um anschließend eine integrierte Erprobungskampagne fahren zu können. In realen Versuchen ist es möglich, simulierte Verkehrsteilnehmer in die Navigationssysteme der „Josephine“ einzuspielen und so bestimmte Szenarien gefahrlos auf See durchzuspielen. Die „Josephine“ wird laufend weiterentwickelt und zukünftig weitere Funktionen wie die Simulation verschiedenartiger Schiffsdynamiken anbieten.

Referenzwasserstraße: Die bereits im Forschungszentrum Critical Systems Engineering for socio-technical Systems aufgebauten Sensorstationen in Brunsbüttel und Cuxhaven wurden im Rahmen des ACTRESS-Projektes weiter ausgebaut und mit genauerer Sensorik ausgestattet. Mittels dieser Installationen ist es möglich, den Schiffsverkehr in der Elbe-Mündung zu beobachten, für spätere Analysen in anonymisierter Form wiederzuverwenden oder auch direkt in die nachfolgend dargestellte Co-Simulationsumgebung für mixed-reality Kampagnen zu integrieren. Die Abbildungen 3 und 6 zeigen die Sensor-komponenten der Referenzwasserstraße.

## 2.2. VIRTUELLE KOMPONENTEN

Neben den physischen Komponenten stellt die ACTRESS-TEP auch eine virtuelle Umgebung zur Verfügung, um flexibel unterschiedliche Anwendungsfälle zu erproben.

Offene Simulationsumgebung: Die ACTRESS-TEP enthält eine vollständig selbst entwickelte Co-Simulationsumgebung, mit der verschiedene V&V-Kampagnen entwickelt und durchgeführt werden können. Die Eigenentwicklung dieser Umgebung bietet den Vorteil, dass alle Komponenten und Schnittstellen zugreifbar sind und an spezielle Anforderungen angepasst werden können. Über diese Offenheit wird die Zukunftsfähigkeit der ACTRESS-TEP sichergestellt, da Erweiterungen, die sich aus heute noch nicht absehbaren Anforderungen ergeben, jederzeit vorgenommen werden können.

Die Co-Simulationsumgebung verwendet ein S-100-basiertes Datenmodell für die Repräsentation von Umgebung und maritimen Verkehrsteilnehmer. Sie ermöglicht die Anbindung virtueller Sensormodelle sowie physischer Sensoren, beispielsweise aus der Referenzwasserstraße. Es wird somit eine besonders hohe Flexibilität von vollständig virtuellen Erprobungskampagnen bis hin zu mixed-reality-Anwendungen erreicht, in denen physische und virtuelle Komponenten zusammenspielen müssen.

V&V-Simulator im Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Neben der offenen Simulationsumgebung wurde ein weiterer Simulator am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) installiert, der ebenfalls für Erprobungen neuartiger maritimer Systeme verfügbar ist. Bei diesem Simulator handelt es sich um eine Weiterentwicklung eines zertifizierten maritimen Trainingssimulators. Die Erweiterungen erlauben die automatisierte Durchführung von Verifikations- und Validierungskampagnen. Der Vorteil dieser Umgebung ist, dass sie aus zertifizierten Hardware-Komponenten besteht und so eine möglichst realistische laborbasierte Hardware-Umgebung für zu testende Systeme bietet.

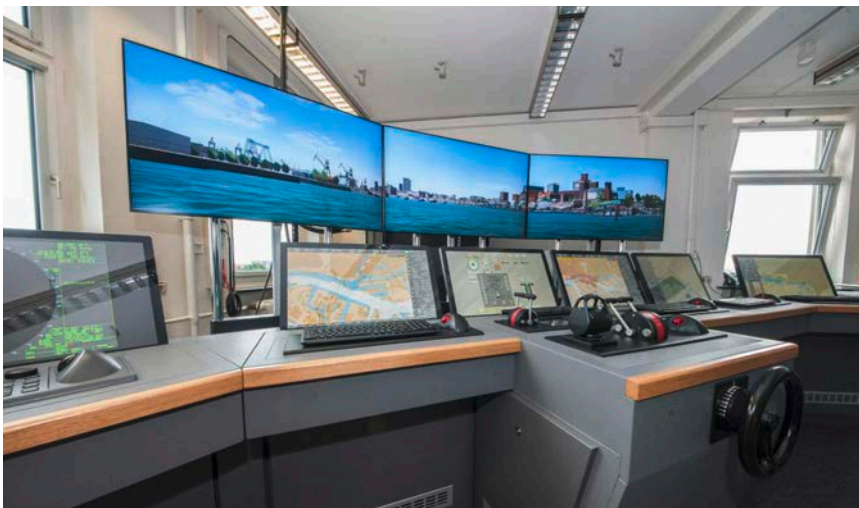


Abb. 7: Simulator für Erprobungen neuartiger maritimer Systeme am BSH in Hamburg



Die beiden Komponenten können zusammengeschaltet werden und als verteilte Co-Simulationsumgebung oder in Kombination mit den physischen Komponenten der TEP genutzt werden. Darüber hinaus wurden für größere Untersuchungen Schnittstellen zur Anbindung an das European Maritime Simulator Network entwickelt, um weitere Simulatoren dazuschalten. Beide Simulationsumgebungen bieten außerdem die Möglichkeit, externe Modelle wie Sensor- und Maschinenmodelle zu integrieren, was eine Anpassung der Erprobungskampagnen an die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Untersuchungen erlaubt.

### **2.3. METHODEN, WERKZEUGE UND DIENSTE**

Neben den eigentlichen Komponenten der Technologieentwicklungsplattform wurden im Rahmen des Projektes auch Methoden und Werkzeuge für die Erstellung und Umsetzung von Erprobungskampagnen mit der TEP entwickelt.

#### **Simulations- und szenarienbasierte Verifikation und Validierung**

Hochautomatisierte Systeme stellen eine Systemklasse dar, deren Spezifikation nicht mehr vollständig möglich ist. Daher müssen diese Systeme insbesondere unter Nutzung von simulations- und szenarienbasierten Methoden verifiziert und validiert werden. Im Rahmen des Projektes ACTRESS wurde hierzu insbesondere ein Verfahren zur Identifikation und Beschreibung von maritimen Verkehrsszenarien sowie ihrer automatischen Extraktion aus Daten bzw. Erzeugung im Simulator entwickelt.

#### **Mixed-Reality-based Testing**

Im Kontext von ACTRESS wurde untersucht, wie physische und virtuelle Komponenten in einer gemeinsamen maritimen Erprobungskampagne genutzt werden können. Hierzu wurden Schnittstellen zum Datenaustausch zwischen den physischen und virtuellen Komponenten der Technologieentwicklungsplattform etabliert, die sowohl eine Einspeisung virtueller Daten in physische Komponenten (zum Beispiel an Bord der „Josephine“) als auch die Einspeisung von echten Sensordaten in die virtuelle Simulationsumgebung ermöglichen.

#### **Verfahren zur Sensorintegration**

Das Fraunhofer FKIE hat die Integration von zusätzlichen Sensoren in einen bestehenden Sensorverbund mit nachfolgender Sensordatenfusion untersucht. Ziel ist, die Detektions- und Lokalisierungsleistung von Objekten im Wasser zu verbessern und damit gefährliche Situationen (wie einen Containerverlust) frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden. Dazu wurde ein mehrstufiges Verifikations- und Fusionskonzept entwickelt (in Abbildung 8, linke Seite, schematisch dargestellt). Das Schema und erste Tests mit simulierten Daten sind in [3] beschrieben. Für den Test im realen Betrieb wurden von FKIE zwei Kamerasysteme aus handelsüblicher Sensorik aufgebaut und anhand von Bildverarbeitungsverfahren an die Detektion von Objekten auf dem Wasser angepasst. Die Integration der Kameradaten in das Gesamtlagebild und der dadurch erzielte Fusionsgewinn wurde während der abschließenden Messkampagne in Wilhelmshaven demonstriert. In Abbildung 8 (rechts) ist ein Auszug aus einem Szenario mit zwei kooperativen Booten und

einem zusätzlichen Segelboot dargestellt. Die dargestellten Peilstrahlen visualisieren dabei die Detektionen der beiden Kamerasysteme.

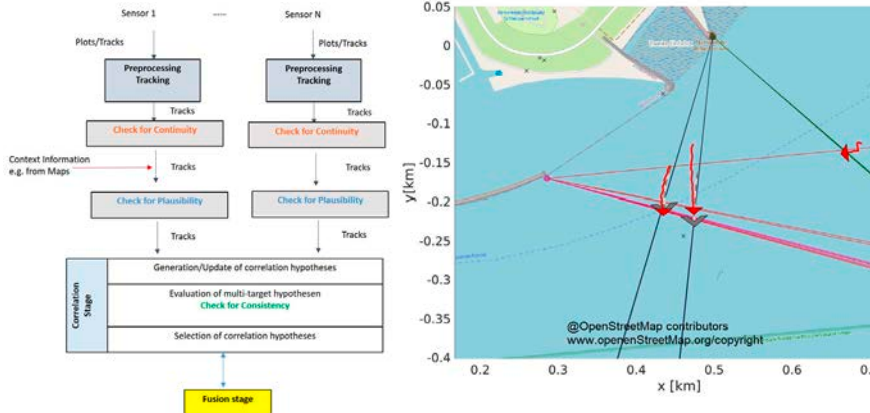


Abb. 8: Schema der Sensorverifikation auf verschiedenen Ebenen der Datenfusionsarchitektur (links) mit Anwendung in einem Szenario mit drei Booten (rechts)

### Datenerhebung und -bereitstellung

Durch die Installation stationärer Sensorik entlang der Elbe-Mündung ist es möglich, den Schiffsverkehr mit Hilfe unterschiedlicher Sensorik (AIS, RADAR, Kamera) zu beobachten und entsprechende Verkehrsdaten in anonymisierter Form aufzuzeichnen. Diese aufgezeichneten Verkehrsdaten werden über die ACTRESS-TEP für die Erprobung von maritimen Systemen genutzt. Zusätzlich ist je nach Bedarf auch die Aufzeichnung spezieller Kampagnen entweder mit stationärer Sensorik oder mit dem Forschungsboot „Josephine“ möglich. So können schließlich auch Daten mit dem vorhandenen Laserscanner oder an anderen Orten aufgezeichnet und bereitgestellt werden.

## 3. USE CASES

Die Technologieentwicklungsplattform wurde im Rahmen des Projektes anhand verschiedener Use Cases erprobt. Diese Use Cases bilden unterschiedliche Systemanforderungen ab, die verschiedene Aspekte der Plattform nutzen.

Im Use Case „Cybersicherheit an Bord“ wurden vor allem die Anforderungen abgebildet, die sich aus einer zunehmenden Vernetzung von Schiffen mit landseitigen Systemen, anderen Schiffen, aber auch der einzelnen Komponenten an Bord der Schiffe untereinander ergeben. Mit Hilfe der Technologieentwicklungsplattform wurde ermittelt, wie sich diese Herausforderungen gezielt in einer gesicherten Umgebung provozieren lassen und im Falle der Identifikation potenzieller Gefährdungen hierfür gezielt Gegenmaßnahmen entwickeln lassen.

Im Use Case „Maritime Autonome Systeme“ wurde der Fall einer Containerschiff-Havarie, der bereits im Antrag des Projektes 2017 als potenzielles Risiko dargestellt worden war und

sich Anfang 2019 mit der Havarie der „MSC Zoe“ bewahrheitete, auf der Technologieentwicklungsplattform untersucht. Hier wurden im Speziellen die Eigenschaften autonomer Systeme untersucht. Anschließend wurde erforscht, wie sich die verschiedenen Einsatzszenarien in einer Technologieentwicklungsplattform abbilden und welche Rückschlüsse sich daraus auf den praktischen Betrieb schließen lassen.

Im Use Case „Simulationsbasierte Abnahme und Zertifizierung“ wird der Situation Rechnung getragen, dass sich durch zunehmende Vernetzung und immer stärker ausgeprägtere Automationsgrade maritimer Systeme nicht mehr alle Eigenschaften dieser Systeme vollständig modellieren oder gar physisch erproben lassen. Daher wurden in diesem Use Case simulationsbasierte und szenariobasierte Verfahren der Zertifizierung getestet, die zukünftig verstärkt im Rahmen der Zulassung maritimer Systeme eingesetzt werden sollen.

Im Use Case „Sensorintegration“ wurde die Erweiterung bestehender maritimer Systems-of-Systems um zusätzliche Sensorik untersucht.

### **3.1. USE CASE: CYBERSICHERHEIT AN BORD**

Zunehmende Vernetzungsmöglichkeiten erzeugen auch in maritimen Systemen immer mehr offene Systemarchitekturen mit neuen Angriffsmöglichkeiten. Hier bekommen Fragen der IT-Sicherheit eine besondere Bedeutung. Das zeigen verschiedene Szenarien von Raytheon Anschütz (RAY), Fraunhofer FKIE, AVL Software and Functions (AVL) und DNV (Klassifikationsgesellschaft) mit dem Ziel eines Ausfalls von IT-Systemen auf der Brücke und im Maschinenraum eines Seeschiffes bei der Revierfahrt. Erprobt wurde ein multivektorieller Angriff auf Navigations- und Antriebssysteme mit dem Ziel der Erreichung einer Havarie und damit der Blockade einer Wasserstraße. Um dieses Szenario zu verhindern, bedarf es in zukünftigen vernetzteren Umgebungen Technologien für den Schutz vor Systemänderungen, Erkennung von Gefährdungen und Strategien für deren Bekämpfung oder Isolierung. Im Kontext dieses Szenarios wurden zukünftige Cyber-Angriffsmöglichkeiten (Vektoren) auf zukünftig vernetzte Schiffssysteme untersucht und daraus resultierende potenzielle Schäden identifiziert. Diese Angriffsvektoren wurden nach verschiedenen Kriterien bewertet. Basierend auf dieser Analyse wurde ein integriertes Security-Konzept entwickelt, welches die identifizierten Schwachstellen adressiert und entsprechende Gegenmaßnahmen vorschlägt und umsetzt.

Insbesondere der Glaube, dass die Authentizität der Kommunikation nautischer Daten in vernetzten Brückennetzwerken gegeben ist, kann als Angriffsvektor genutzt werden. Für den Use Case „Cyberangriff auf ein Seeschiff“ wurde von Fraunhofer FKIE in Zusammenarbeit mit Raytheon Anschütz das Maritime Cyber Security Lab (MCSL), eine auf Cybersicherheit spezialisierte V&V-Umgebung, implementiert. Das Herzstück der Umgebung ist das Bridge Attack Tool (BRAT) [5], mit dem Cyberangriffe auf integrierte Brückensysteme zur Entwicklung, Validierung und Bewertung von Cybersicherheitsanwendungen durchgeführt werden können. Im Rahmen des Projekts wurden überdies drei Sicherheitsmechanismen zur Verbesserung der Cybersicherheit implementiert, getestet und evaluiert. Diese Sicherheitsmechanis-

men sind Signaturen für Maritime Protokolle (SIGMAR) [6], der Maritime System Analyzer (MARISTA), und der Maritime NMEA Network Intrusion Detector (MANNI). Abbildung 9 zeigt eine Übersicht der MCSL Umgebung.

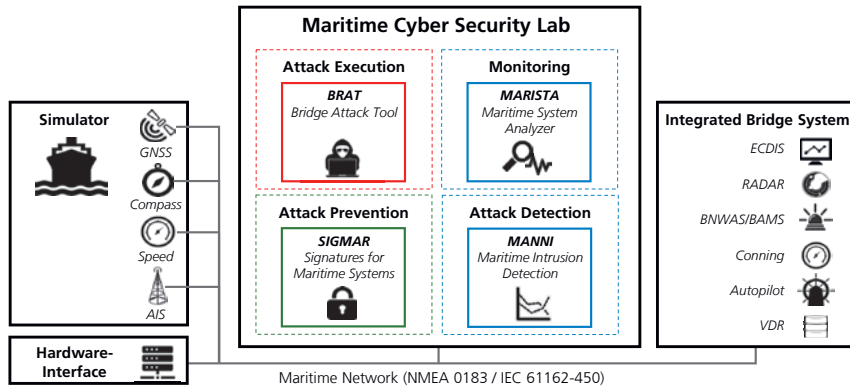


Abb. 9: Das Maritime Cyber Security Lab (MCSL) ermöglicht die Entwicklung, Validierung und Bewertung von Cybersicherheitsanwendungen für maritime Systeme.

Durch BRAT [5] lassen sich Angriffe auf nautische Daten eines integrierten Brückensystems durchführen. Ziel der Angriffe ist die Täuschung des nautischen Personals durch Manipulation des Lagebilds. Implementierte Angriffe haben beispielsweise Auswirkungen auf eine falsche Darstellung der eigenen Position oder der Position anderer maritimer Verkehrsteilnehmer, die in kritischen Situationen zur Havarie oder Kollision führen können. Mit BRAT lassen sich Angriffe auf integrierte Brückensysteme einfach konfigurieren und mittels einer Weboberfläche steuern, sodass auch nicht-technisches Personal Angriffsszenarien ausführen kann.

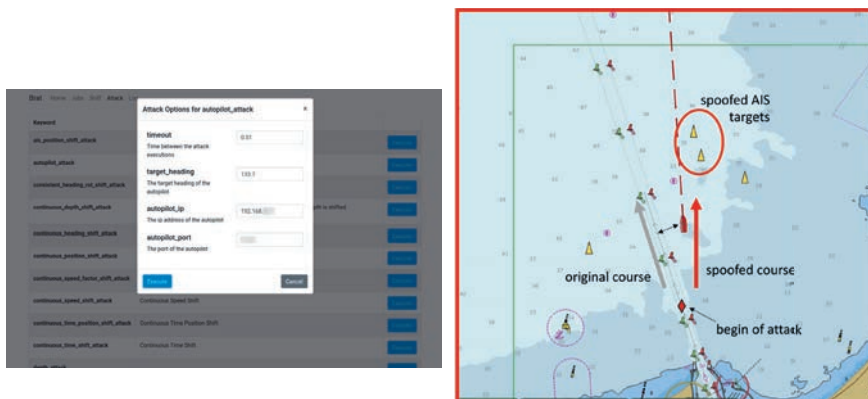


Abb. 10: Mit BRAT lassen sich Cyberangriffe auf Schiffsbrücken mittels Weboberfläche konfigurieren und steuern. Diese Angriffe täuschen das Lagebild für das nautische Personal und führen dadurch zu Havarien oder Kollisionen.

Die beiden betrachteten Szenarien demonstrieren komplexe Systeme und Systemverbünde bzw. Systeme von Systemen (SoS) mit hohen Anforderungen bezüglich Autonomie, Kooperation, Zuverlässigkeit und Sicherheit. Innovative System- und Sicherheitsarchitekturen (RAY, Fraunhofer FKIE) erlauben eine zuverlässige, gegen Angriffe gehärtete Konzeption und Entwicklung von SoS. Ein vernetzter Systemverbund bedarf modularer und dynamisch rekonfigurierbarer, updatefähiger und erweiterbarer Architekturen, die es ermöglichen, Subsysteme, Funktionen, Komponenten auch nach der Inbetriebnahme des Technologieträgers an neue Gegebenheiten anzupassen, zu aktualisieren oder aus der aktuellen Systemkonfiguration zu entfernen, ohne die Systemsicherheit zu kompromittieren.

### 3.2. USE CASE: MARITIME AUTONOME SYSTEME

In diesem Use Case wurden insbesondere Eigenschaften autonomer maritimer Systeme und die damit einhergehenden Herausforderungen bei ihrer Entwicklung und Erprobung untersucht. Es wurden zwei unterschiedliche Systems under Test (SuT) untersucht. Beim ersten untersuchten System handelt es sich um ein autonomes System, das zum Beispiel im Falle der eingangs erwähnten Havarie eines Containerschiffs zur Untersuchung der Unfallstelle und Unterstützung der Container-Bergung genutzt werden kann. Beim zweiten untersuchten System handelt es sich um eine Komponente zur Erkennung von Kollisionsverhütungsregeln (KVR) in unterschiedlichen maritimen Verkehrsszenarien.

#### Container-Havarie

Dieses Szenario beschreibt den Fall des Verlustes von Containern durch ein Containerschiff in einer vielbefahrenen Meeresregion, wie es 2019 durch die Havarie der „MSC Zoe“ Realität wurde. Im zukünftigen Endausbau dieses Szenarios kommen unterschiedliche autonome und manuell gesteuerte maritime Systeme zur Lagebilderzeugung zum Einsatz, um eine möglichst effiziente und effektive Sicherung der Unfallstelle und damit die Vermeidung von Gefährdungen anderer Verkehrsteilnehmer durch verlorene Container umzusetzen.

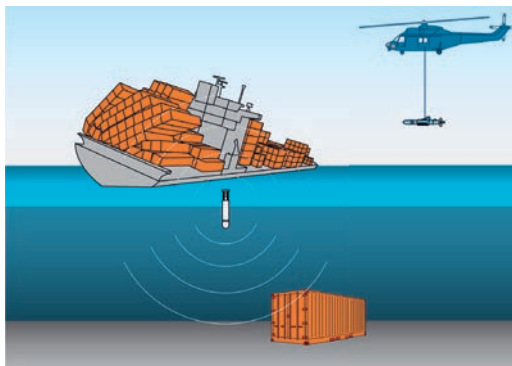


Abb. 11: Luftverlastung eines geeignet ausgestatteten autonomen Unterwasserfahrzeugs (Autonomous Underwater Vehicle; AUV) und eines Kommunikationsknotens (Boje) im zukünftigen Endausbau des Szenarios.

Charakteristisch ist in diesem Szenario die Einbindung sicherer rekonfigurierender und vernetzter maritimer Systeme zu einem Systemverbund, um eine gemeinsame Aufgabe zu lösen. Es werden nach der Auswertung erster Lageinformationen autonome Unter- und Überwassereinheiten per Lufttransport im Unfallgebiet abgesetzt. Diese koordinieren sich selbstständig und senden ihre Erkenntnisse per Kommunikationsboje an Land zur Erstellung eines integrierten Echtzeitlagebildes zwecks Koordination des Einsatzes von Such- und Rettungseinheiten (SAR; Search and Rescue). Damit sind eine ganze Reihe einzelner Systeme an diesem Szenario beteiligt: (1) Luftfahrzeug zur Verbringung der autonomen Wassereinheiten, (2) autonome Unterwasser- und Überwassereinheiten, (3) Kommunikationssysteme (Boje und Landstation), (4) Lagezentrum an Land sowie (5) die Schiffe für den eigentlichen späteren SAR-Einsatz. Die Absicherung der Eigenschaften solcher Systeme bedarf umfangreicher Testumgebungen. Die Abbildung 12 zeigt die von ATLAS ELEKTRONIK real nachgestellten Varianten des Szenarios. Auf der linken Seite ist das Zuwasserlassen des autonomen Unterwasserfahrzeuges von einem Schiff und rechts das Lagezentrum der Missionsführung zu sehen.



Abb. 12: Eindrücke des Szenarios „Containerverlust“

Neben der Erprobung unterschiedlicher Missionsszenarien der autonomen Unterwasser-einheiten und deren korrekter Durchführung mit Hilfe der Technologieentwicklungsplattform wurden auch die Verfahren zur Sensorintegration und -fusion der Kamerasensoren des Fraunhofer FKIE anhand der Erweiterung des Lagebildes durch zusätzliche Sensorinformationen erprobt. Neben den Schnittstellen für diese Sensoren wurde eine spezielle Schnittstelle zu den Kamerasensoren umgesetzt, die den Apache ActiveMQMessage Broker nutzt.

### Klassifikation von Begegnungssituationen

Im Projekt MTCAS (FKZ: 03SX405) wurde als Bestandteil des dort entwickelten maritimen Kollisionsvermeidungssystems eine Komponente entwickelt, die eine Identifikation und Klassifikation von Begegnungssituationen mehrerer Schiffe vornimmt und diese anhand der Kollisionsverhütungsregeln bewertet. Der COLREG-Checker analysiert mittels vorhandener Navigationssensoren die Verkehrssituation, in der sich Schiffe befinden, und klassifiziert die Situation in die Klassen "Crossing", "Head-On", "Overtaking", "Being-Overtaken" und "No Danger". Zur Beurteilung werden AIS- (Automatic Identification System) und/oder Radartrack-Daten genutzt.

Die Tatsache, dass diese Systemkomponente reale Sensordaten für die Bewertung von Verkehrsszenarien heranzieht, macht es zu einem geeigneten Beispiel für ein System, das mit Hilfe einer szenarienbasierten Verifikation untersucht werden soll. Die mit Hilfe der Sensoren erfassten Verkehrssituationen bilden einen kontinuierlichen Parameterraum, der unterschiedliche Szenarien beschreiben kann. Mit Hilfe der Technologienentwicklungsplattform sollte anhand dieses einfachen Beispiels erprobt werden, wie sich eine szenarienbasierte Verifikation und Validierung für hochautomatisierte und autonome maritime Systeme umsetzen lässt. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

Zunächst wurde untersucht, welche Parameter für die Verifikation und Validierung des genannten Systems von Bedeutung sind und wie sich diese Parameter ausprägen müssen, um bestimmte Verkehrsszenarien, wie zuvor dargestellt, abbilden zu können. Im Wesentlichen wurden für die Untersuchungen die nachfolgend genannten Parameter mit den genannten Grenzwerten herangezogen:

V-Par.	Grenzwerte	Einheit	Beschreibung
$\Delta\text{COG}$	22.5, 170, 190, 337.5	[°]	Kursdifferenz
$\Delta\text{SOG}$	0	[m/s]	Geschwindigkeitsdifferenz
$\Delta(\text{COG}, \text{Bearing})$	45, 315	[°]	Differenz aus Peilung und Kurs
DCPA	2	[sm]	Distanz im Closest-Point-of-Approach

Die Wertebereiche dieser Parameter wurden anschließend diskretisiert, wobei hier auf äquidistante Intervalle zwischen den Grenzwerten gesetzt wurde. Lediglich in der Nähe der Grenzwerte wurden die Diskretisierungsintervalle um den Faktor 10 verkleinert.

Basierend auf diesen Parametern und der entsprechenden Diskretisierung wurden Parameterkonfigurationen ermittelt, die unterschiedliche Startszenerarien beschreiben, die anschließend entweder in der Simulation oder auch im Feld abgefahren werden können. Die nachfolgend dargestellte Abbildung zeigt die Menge der identifizierten Startkonfigurationen der Parameter. Hieraus ist bereits ersichtlich, dass schon in diesem sehr einfachen Fall eine ganze Reihe von Szenarien entstehen können, die für die Verifikation und Validierung eines einfachen maritimen Systems herangezogen werden müssen.

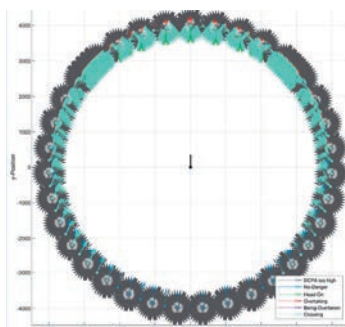


Abb. 13: Startzustände der Verifikationsszenarien mit farblich kenntlich gemachten Sollwerten

Im Rahmen eines Feldtests im Jahr 2020, der mit Hilfe der Otzum<sup>9</sup> und der Josephine durchgeführt wurde, wurden Szenarien ermittelt, die im zeitlichen Verlauf möglichst viele dieser Zustände durchlaufen. Ein Beispiel für ein Szenario aus einem Feldtest 2020 ist in der Abbildung 14 dargestellt.

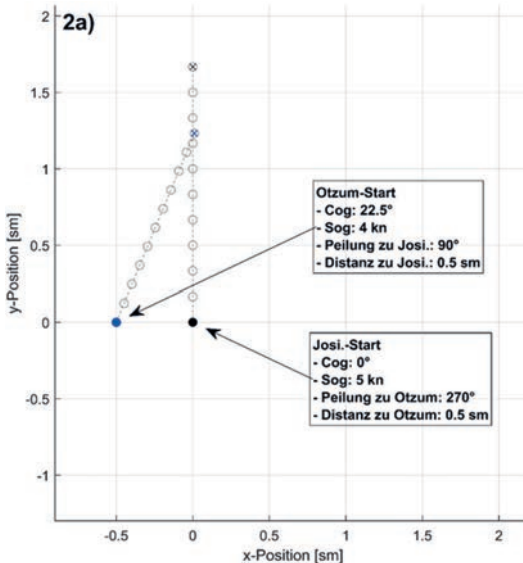


Abbildung 14: Feldtest-Szenario 2a). Szenario-Parameter der beteiligten Schiffe (Forschungsboote: OS: Josephine und TS: Otzum) sind in den jeweiligen Boxen aufgeführt

Die Szenarien wurden innerhalb des Feldtests mehrfach durchgeführt. Anschließend wurde bestimmt, welche und wie viele Diskretisierungsintervalle durch das jeweilige Szenario abgedeckt wurden. Hieraus lässt sich die Validität der Erprobungskampagne abschätzen, die für die Bewertung der erzielten Ergebnisse des Systems unter Test von Bedeutung ist. Es wird also die Frage beantwortet, ob die jeweilige Erprobungskampagne ausreichend und zielführend war.

### 3.3. USE CASE: SIMULATIONSBASIERTE ABNAHME UND (RE-)ZERTIFIZIERUNG

In der maritimen Industrie im Allgemeinen und der Schifffahrt im Besonderen gibt es Visionen, durch eine weitgehende Autonomie der Systeme Kosten zu reduzieren, die Effizienz zu steigern und die Qualität zu verbessern. Die „Eigenständigkeit“ der Systeme soll durch eine verstärkte Vernetzung aller Systemkomponenten mit Hilfe von Software erreicht werden, die sich im Systemkontext dann gegenseitig beeinflussen und miteinander interagieren. Damit wird die noch relative neue mechatronische Sichtweise um den „cyber-physischen“ Aspekt erweitert.

Für die Betriebssicherheit solcher Systeme und den entsprechenden Nachweis hat das zur Folge, dass der etablierte und bestens erprobte Sicherheitsnachweis für die analogen Komponenten an Bedeutung verliert und der Nachweis der Funktionsfähigkeit und damit der



Sicherheitsnachweis für die eingesetzten Softwarekomponenten an Bedeutung gewinnt. Dieser Nachweis wird dabei immer komplexer und somit immer aufwendiger und teurer. Dieser Effekt potenziert sich, wenn der Grad der Autonomie der Teilsysteme oder des Gesamtsystems zunimmt.

Aus diesem Ansatz wurde ein Anwendungsfall formuliert, dem die Annahme zu Grunde liegt, dass zukünftig für die Genehmigung der Systemarchitektur (Design) und für die Zertifizierung der Implementierung von Assistenzsystemen, die in ein integriertes Brückensystem eingebettet sind, die Funktionsfähigkeit der Gesamtlösung simulationsbasiert nachgewiesen werden muss. Ein typisches Beispiel für ein solches Assistenzsystem wäre ein dynamisches Positionierungssystem. Bisher werden solche Systeme separat betrieben. Sie sind jedoch auf Grund ihres Zusammenspiels von Softwarekomponenten, komplexer Steuer- und Regelungstechnik und vielfältiger Hardware das klassische und damit am besten erprobte maritime Cyberphysical System of Systems.

Es wird angenommen, dass die Herstellerfirmen der Brücke, der PPS-Software, der Ruderanlage sowie der Antriebskomponente nicht identisch sind und ihre Produkte erst im Schiff zu einem System „verschaltet“ werden. In der Entwurfsphase wäre es dann notwendig, mit Hilfe von verteilten Simulationen zu testen, ob das Gesamtsystem im Zusammenspiel der Komponenten seine Aufgaben zu jedem Zeitpunkt sicher ausführen kann und ob im Falle einer Störung immer ein sicherer Zustand erreicht wird. Zu diesem Zweck muss aus den genehmigten Einzelsimulationen die Simulation eines System of Systems konfiguriert werden. Dazu wurden prototypisch die Simulationen des Navigationssystems von Raytheon mit den Simulationen der Antriebssysteme von AVL sowie der DP-Simulation des DNV miteinander gekoppelt (siehe Abbildung 15).

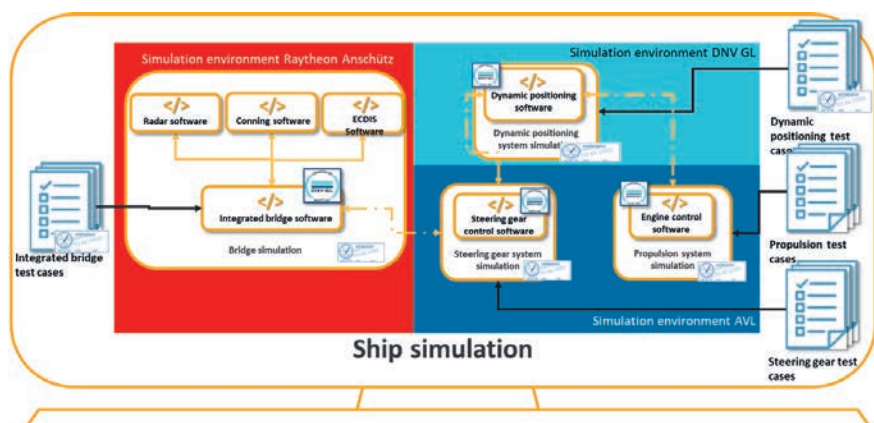


Abb. 15: Systemabnahme in einer verteilten Simulationsumgebung

Anhand von Testszenarien sollte dann gezeigt werden, dass Störungen durch eine Cyber-Attacke nicht zu einem sicherheitskritischen Betriebszustand im Zusammenspiel der genehmigten Teilsysteme führen. Am Anfang schien es so, als seien für alle Teilkomponenten

die Einzelsimulationen verfügbar bzw. könnten mit überschaubarem Aufwand erstellt und miteinander verknüpft werden. Im Laufe der Projektarbeit stellte sich jedoch heraus, dass die Annahmen viel zu optimistisch waren und keine dieser Simulationen einen Grad der Unabhängigkeit aufwies, der für einen Einsatz in einer verteilten Simulation erforderlich wäre. Als Ergebnis aus dieser Aktivität kann daher festgehalten werden, dass zwar über die ACTRESS-TEP jetzt erste Ansätze für die simulationsbasierte Verifikation und Validierung vorhanden sind, es aber weiterer Forschung hinsichtlich valider Simulationsmodelle von maritimen Systemkomponenten für die Verifikation und Validierung hochkomplexer automatisierter maritimer Systeme bedarf.

Dieses Problem wird im Teilszenario „Simulationsbasierte (Re-)Zertifizierung von integrierten Assistenzsystemen im Schiffsbetrieb“ noch virulenter, denn in diesem Szenario sollte eruiert werden, ob sich die Simulationen aus der Genehmigungsphase auch für die Verifikation der Systemintegrität nach einer massiven Störung im Betrieb, zum Beispiel in Folge einer Cyberattacke, eignen. Soll das sichere Zusammenspiel der Teilsysteme eines Schiffes, das sich in einer realen und komplexen Verkehrssituation befindet, in einer Simulation nachgewiesen werden, ist eben auch zu berücksichtigen, dass die Echtzeitdaten von Bord die wichtigsten Parameter der Simulation liefern, da nachzuweisen ist, dass Reparaturen und gegebenenfalls notwendige Neuinstallationen die Folgen der Störung vollständig behoben haben und das System wieder fehlerfrei arbeitet (siehe Abbildung 16). Auch für dieses Szenario ist weitere Forschung zu validen Simulationsmodellen nötig.

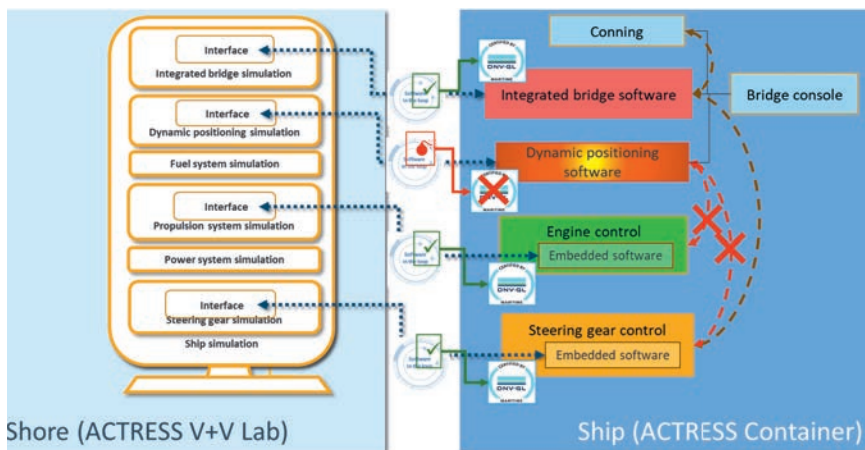


Abb. 16: Partielle Rezertifizierung nach Systemwiederherstellung

Für ein Schiff, dessen Betrieb sich auf diese Technologien sowie deren Interaktion mit einem menschlichen Bediener verlässt, ergeben sich eine Reihe von zusätzlichen Risiken für die Betriebssicherheit. Diese Risiken werden von den bestehenden Klassenregeln nicht ausreichend berücksichtigt. Deshalb hat DNV bereits die Klassenrichtlinie "Autonome und ferngesteuerte Schiffe" herausgegeben, um die Industrie und die Aufsichtsbehörden bei der Dokumentation und Gewährleistung einer sicheren Implementierung zu unterstützen.

2021 wurde die DNV-RP-0513 „Assurance of simulation models“ veröffentlicht, in die die Erfahrungen aus ACTRESS mit eingeflossen sind, um eine valide Vorgehensweise beim verstärkten Einsatz von Simulationen in der Konstruktion zu empfehlen.

Neue Schiffsbetriebskonzepte, die auf der autonomen und ferngesteuerten Kontrolle von Schiffsfunktionen basieren, müssen im Vergleich zum konventionellen Schiffsbetrieb ein gleichwertiges oder besseres Sicherheitsniveau aufweisen. Bei der Betrachtung von Sicherheitsmaßnahmen für ein Schiff dürfen sich die mit den neuen Betriebskonzepten verbundenen Risiken nicht nur auf die Folgen für die Besatzung an Bord konzentrieren, sondern müssen auch die Folgen für die Öffentlichkeit, die Vermögenswerte und die Umwelt berücksichtigen.

Daraus ergibt sich, analog zu anderen Branchen, ein klarer Bedarf für den Einsatz digitaler Zwillinge. Zustandsdaten müssen systematisch gesammelt werden, um rechtzeitig Entscheidungen in Bezug auf erforderliche Wartungsarbeiten, Updates der Steuerungssoftware inkl. Neukonfiguration zu treffen. Die Fähigkeit, das Verhalten von Komponenten und Systemen zu simulieren, ist in dieser Hinsicht entscheidend. So erfordern zum Beispiel die Updates der Steuerungssoftware systematische Tests mit einem digitalen Zwilling, bevor sie im laufenden Betrieb an Bord installiert werden können. Allerdings wurde erst im Projektverlauf wirklich deutlich, wie viel Basisarbeit im Bereich Forschung und Entwicklung noch zu leisten ist, bevor die theoretische Ausgangssituation, die diesem Szenario zu Grunde liegt, in die Realität übertragen werden kann.

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Im Projekt ACTRESS wurde eine Technologieentwicklungsplattform geschaffen, die mit physischen und virtuellen Komponenten die Entwicklung und Erprobung zukünftiger hochautomatisierter und autonomer maritimer Systeme unterstützt. Die physischen Komponenten können für verschiedene Anwendungsszenarien in der Nord- und Ostsee eingesetzt werden. Die virtuellen Komponenten bieten mit der Vernetzung mehrerer Simulatoren am OFFIS und am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie zahlreiche Möglichkeiten für Experimente, auch für einfache Erprobungen in rein virtuellen Umgebungen. Die Technologieentwicklungsplattform ist so aufgebaut, dass sie die gleichzeitige Integration und Nutzung physischer und virtueller Komponenten in einer Entwicklungs- und Erprobungskampagne unterstützt.

Zusätzlich zu den Komponenten wurden auch Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung und Erprobung hochautomatisierter maritimer Systeme entwickelt. Hierbei handelt es sich in der Regel um Verfahren, die beschreiben, wie bei der Entwicklung und Erprobung von Systemen aus der neuen Klasse der hochautomatisierten und autonomen Systeme idealerweise vorgegangen wird, um die Besonderheiten dieser Systemklasse, beispielsweise die Nicht-Abgeschlossenheit der Systemumgebung, zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Projektes wurde die Technologieentwicklungsplattform anhand unterschiedlicher Use Cases evaluiert. Diese Use Cases decken dabei die Themenfelder Safety und Security ab und nutzen sowohl die physischen als auch die virtuellen Komponenten der Plattform.

Die Technologieentwicklungsplattform wurde im Nachgang des Projektes in die eMaritime Integrated Reference Platform integriert und steht von nun an allen interessierten Einrichtungen und Unternehmen für die Nutzung zur Entwicklung, Erprobung und Erforschung neuartiger maritimer Systeme zur Verfügung.

## **DANKSAGUNG**

Das Projekt ACTRESS wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie beim Projektträger Jülich unter dem Förderkennzeichen 03SX448 im Titel „Echtzeitdienste für die Maritime Sicherheit“ gefördert. Für die Förderung und hervorragende Zusammenarbeit bedankt sich das Konsortium vielmals.

## LITERATUR

Weitere Details im Kontext des Projektes können den nachfolgend genannten Publikationen entnommen werden.

- [1] T. Wuellner, S. Feuerstack und A. Hahn, "Clustering Environmental Conditions of Historical Accident Data to Efficiently Generate Testing Sceneries for Maritime Systems" in book: Model-Based Safety and Assessment (pp.349-362). DOI:10.1007/978-3-030-32872-6\_23 October 2019.
- [2] A. Akkermann und A. Hahn, "Comparing Simulation with Physical Verification and Validation in a Maritime Test Field". International Journal of Systems Engineering .Volume 4, Issue 2, , Pages: 18-29, December 2020.
- [3] M. Broetje, G. Battistello und M. Ulmke, "Verification of sensor data in a maritime multi-sensor network", Maritime Situational Awareness Workshop (MSAW, Lerici, Italy, 2019)
- [4] N. Rüssmeier, A. Lamm und A. Hahn. A generic testbed for simulation and physical-based testing of maritime cyber-physical system of systems. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1357 (2019) 012025 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1357/1/0120251. 2019.
- [5] C. Hemminghaus, J. Bauer und E. Padilla. BRAT: A BRidge Attack Tool for Cyber Security Assessments of Maritime Systems. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 15, No. 1, doi:10.12716/1001.15.01.02. 2021.
- [6] C. Hemminghaus, J. Bauer und K. Wolsing. SIGMAR: Ensuring Integrity and Authenticity of Maritime Systems using Digital Signatures. International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC 2021), Dubai. 2021



# KAV4D –

NUMERISCHE VORHERSAGE DES ZEITLICHEN VERLAUFS KAVITATIONSBEDINGTER  
EROSIONSSCHÄDEN AN SCHIFFSPROPULSIONS- UND -MANÖVRIERORGANEN

## AUTOREN

<b>DR.-ING. ANDREAS PETERS</b>	UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN (UDE) INSTITUT FÜR SCHIFFSTECHNIK, MEERESTECHNIK UND TRANSPORTSYSTEME
<b>PROF. DR.-ING. ROMUALD SKODA</b>	RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM (RUB), LEHRSTUHL FÜR HYDRAULISCHE STRÖMUNGSMASCHINEN
<b>FELIX SCHREINER</b>	RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM (RUB), LEHRSTUHL FÜR HYDRAULISCHE STRÖMUNGSMASCHINEN
<b>TUNG NGUYEN</b>	J.M. VOITH SE & CO. KG, HEIDENHEIM A. D. BRENZ
<b>LUTZ KLEINSORGE</b>	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH (MMG), WAREN (MÜRITZ)
<b>PROF. DR.-ING. BETTAR O. EL MOCTAR</b>	UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN (UDE), INSTITUT FÜR SCHIFFSTECHNIK, MEERESTECHNIK UND TRANSPORTSYSTEME
<b>YOUJUN YANG</b>	UNIVERSITÄT DUISBURG-ESSEN (UDE), INSTITUT FÜR SCHIFFSTECHNIK, MEERESTECHNIK UND TRANSPORTSYSTEME
<b>HAUKE BAUMFALK</b>	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH (MMG), WAREN (MÜRITZ)
<b>JÖRN KLÜSS</b>	MECKLENBURGER METALLGUSS GMBH (MMG), WAREN (MÜRITZ)
<b>MICHAEL PALM</b>	J.M. VOITH SE & CO. KG, HEIDENHEIM A. D. BRENZ

## EINLEITUNG

Kavitation ist in den meisten Fällen eine unerwünschte Erscheinung; sie spielt in vielen technischen Bereichen eine wichtige Rolle. In der Schiffstechnik ist Kavitation bekannt durch ihre erosive Wirkung auf die Schiffsanhänge infolge des Zerfalls von Kavitationsblasen direkt an der Wandoberfläche. Kavitation kann außerdem Vibrationen aufgrund von Druckschwankungen, Auftriebsverlusten und Geräuschabstrahlungen hervorrufen. Die mit Erosionsschäden infolge Propeller- und Ruderlavitation verbundenen Reparaturen können den wirtschaftlichen Schiffsbetrieb spürbar beeinträchtigen. Während z. B. in Kreiselpumpen die Wolkenlavitation als primäre Ursache für Erosion angesehen werden kann, spielt bei Schiffsanhängen zusätzlich die Wirbel- und Nabenlavitation eine Rolle

und kann die stromab des Propulsionsorgans liegenden Manövrierorgane durch Erosion schädigen. In vielen Fällen lässt sich die kavitationsbedingte Erosion nicht gänzlich vermeiden. Nach derzeitigem Stand der Technik ist es nicht möglich, die Erosionsschäden zu quantifizieren und Lebensdauern von Schiffsanhängen zu prognostizieren. Im Rahmen des Vorhabens „Numerische Vorhersage des zeitlichen Verlaufs kavitationsbedingter Erosionsschäden an Schiffspropulsions- und -manövrierorganen“ (KAV4D) wurden gekoppelte Strömungs- und Materialsimulationen zur Vorhersage des zeitlichen Verlaufes von Erosionsschäden weiterentwickelt, validiert und an exemplarischen Testfällen der maritimen Industrie erprobt. Hierzu wurden Kavitations- und Erosionsmodelle in Form eines „High Precision Tool“ (Auflösung der relevanten Strömungsphysik bei hoher Rechenzeit) und eines schnellen „Fast Solution Tool“ (Impliziter Löser, Kavitations- und Erosionsmodell mit angepassten Modellparametern) weiterentwickelt und bereitgestellt, zwischen denen der Anwender je nach verfügbaren Rechenressourcen wählen kann. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der einzelnen Module zur Erosionsvorhersage. Im Folgenden wird zunächst die eingesetzte die Strömungssimulationemethode und anschließend die Strömungs-Erosions-Kopplungsmethode vorgestellt.

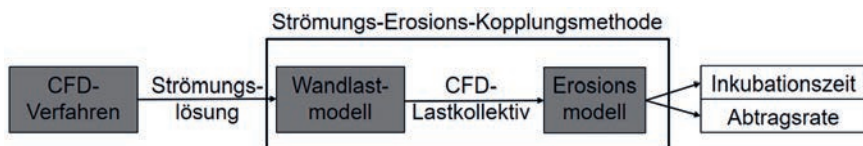


Abb. 1: Schematische Darstellung der Module zur Erosionsvorhersage.

Die hier weiterentwickelten Methoden ermöglichen eine Prognose des Erosionsortes, der Inkubationszeit sowie Abtragsrate und damit eine Einordnung von konstruktiven Varianten, unterschiedlichen Werkstoffen und Betriebsbedingungen bzgl. des zeitlichen Erosionsverlaufs und der Lebensdauer. Die Validierung der Methoden erfolgte neben grundlegenden Testfällen (Basisanwendungen) auch an realen und für das Produktportfolio der industriellen Projektpartner repräsentativen Leitanwendungen. Ein weiteres Ziel des Vorhabens bestand in der Bewertung von Fertigungstechnologien zur Erosionsvermeidung. Dazu wurden verschiedene Oberflächenbeschichtungssysteme für Propeller in Sonotrodenversuchen untersucht.

## NUMERISCHE METHODEN

### 2.1 High precision Tool (HiPT)

Für das „High Precision Tool“ (HiPT) wird der dichtebasierte in-house Strömungslöser (hydrUBFoam) der Ruhr-Universität Bochum verwendet, welcher eine Erweiterung für die open-source Software OpenFOAM (Foam-Extend 4.0) ist. Kompressible Euler-Gleichungen werden mit einer nicht-viskosen Godunov-Flussfunktion und einem optimierten expliziten 4-Stufen Runge-Kutta Zeitverfahren gelöst [1, 2]. Kavitation wird modelliert über einen homogenen Mischungsansatz und eine barotrope Zustandsgleichung. Der Zeitschritt wird durch



eine konstante CFL-Zahl von 1,4 limitiert, wodurch die Größenordnung im Bereich von Nano-Sekunden liegt und die relevante Strömungsphysik (bspw. Druckwellenausbreitung und -stöße) akkurat aufgelöst wird.

## 2.2 FAST SOLUTION Tool (FaST)

Das "Fast Solution Tool" (FaST) verwendet einen druckbasierten Strömungslöser, um die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes(RANS)-Gleichungen zu lösen. Die RANS-Gleichungen werden auf Basis eines sequentiellen Lösungsalgorithmus mit einer Finite-Volumen-Methode diskretisiert. Die Phasengrenze zwischen flüssigem Wasser und Wasserdampf wurde mit der "Volume of Fluid" Methode (VOF) berechnet. Dazu wird eine skalare Transportgleichung für den Volumenfraktionsanteil der beiden Phasen gelöst. Zur Simulation kavitierender Strömungen wird die rechte Seite der Volumenfraktionsgleichung um Quellterme zur Modellierung von Kondensations- und Verdampfungsprozessen erweitert. In FaST wird dazu auf das Kavitationsmodell von Sauer und Schnerr [3] zurückgegriffen. Im Laufe des Vorhabens zeigte sich außerdem, dass die Annahme einer inkompressiblen Strömung des flüssigen Wassers zur Simulation kollabierender Kavitationswolken zu ungenauen Berechnungen hoher Spitzendrücke führt. Im Zuge dessen wurde der Strömungslöser erweitert, um die Kompressibilität der Flüssigphase entsprechend der Tait-Zustandsgleichung für flüssiges Wasser zu berücksichtigen [4-6]. Bei entsprechender zeitlicher und räumlicher Diskretisierung lässt sich somit, analog zum HiPT, die Ausbreitung von Druckwellen auflösen.

## 2.3 Strömungs-Erosions-Kopplungsmethode

Zur Vorhersage von Erosionsschäden wird die Strömungslösung des CFD-Verfahrens mit Hilfe eines Wandlast-Modells an das Erosionsmodell von Franc [7] gekoppelt. Das Wandlast-Modell basiert auf der verbreiteten Annahme, dass Druckwellen anhaftende Blasen anregen, welche wiederum unter der Ausbildung eines Micro-Jets kollabieren [8]. Die Spannung eines solchen Micro-Jets wird nach Joukowsky [9] berechnet durch

$$\sigma = \rho_l c_s c_{jet} \quad (1)$$

$\rho_l$  ist die Flüssigkeitsdichte und  $c_s$  die Schallgeschwindigkeit in der Flüssigkeit. Die Jet-Geschwindigkeit,  $c_{jet}$ , wird nach Plesset und Chapman [10] wie folgt approximiert:

$$c_{jet} = 8,97\gamma^2 \sqrt{\frac{p - p_v}{\rho_l}} \quad (2)$$

$\gamma$  entspricht dem dimensionslosen Wandabstand und  $p_v$  dem Dampfdruck. Der Druck  $p$  wird hierbei aus den Wandzellen der Strömungslösung entnommen. Außerdem wird eine Belastungsrate bestimmt, welche aus der zeitlichen Änderung der vorhandenen Blasenkeime approximiert wird

$$N_{Blase} = \frac{\partial(n_0 V_l)}{\partial t} = n_0 V \frac{\partial(1 - \alpha)}{\partial t} = -n_0 V \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (3)$$

Hierbei wird von einer konstanten Keimdichte  $n_0$  ausgegangen.  $V$  entspricht dem Zellvolumen und  $\alpha$  der Dampfvolumentraktion. Die Kondensationsrate  $\partial\alpha/\partial t$  wird ebenfalls aus der Simulation entnommen.

Um das Lastkollektiv statistisch beschreiben zu können, wird eine konditionierte Mittelung von Ereignissen eingeführt, siehe Abbildung 2. Hierbei wird für jede Wandzelle individuell betrachtet, ob zu einem Zeitschritt ein Grenzwert ( $L_\sigma$  bzw.  $L_{\partial\alpha/\partial t}$ ) für die Spannung  $\sigma(p)$  und die Kondensationsrate  $\partial\alpha/\partial t$  überschritten wird. Alle Zustände, welche diese Grenzwerte gleichzeitig überschreiten, werden als erosive Ereignisse eingestuft und in einem zeitlich konvergenten Mittelwert des Drucks  $\bar{p}$  bzw. der Kondensationsrate ( $\partial\alpha/\partial t$ ) verarbeitet. Aus der Anzahl der Ereignisse  $count$  ergibt sich weiterhin eine normierte Erosionswahrscheinlichkeit

$$P_{Er} = count \cdot \frac{\Delta t}{t_{sim}} \quad (4)$$

$\Delta t$  entspricht einem Zeitinkrement, während  $t_{sim}$  die gesamte Simulationszeit beschreibt. Zusätzlich wird die Belastungsrate aus Gleichung 3 mit der Erosionswahrscheinlichkeit  $P_{Er}$  skaliert, da die Auftretshäufigkeit von Ereignissen in den Mittelwerten des Drucks  $\bar{p}$  und der Kondensationsrate  $\partial\alpha/\partial t$  nicht mehr erhalten ist. Die resultierende mittlere Last  $\bar{\sigma} = f(\bar{p})$  und mittlere Rate  $\bar{N} = f(\partial\alpha/\partial t, P_{Er})$  werden anschließend an das Erosionsmodell von Franc [7] in der ursprünglichen Idee des Modells gekoppelt, wodurch sich eine Inkubationszeit  $T = f(\bar{\sigma}, \bar{N})$  und eine Abtragsrate (Mean Depth Penetration Rate)  $MDPR = f(\bar{\sigma}, \bar{N})$  berechnen lassen. Die Material-Parameter des Modells wurden für den Edelstahl 316-L von Franc [7] gemessen und werden für das Modell übernommen.

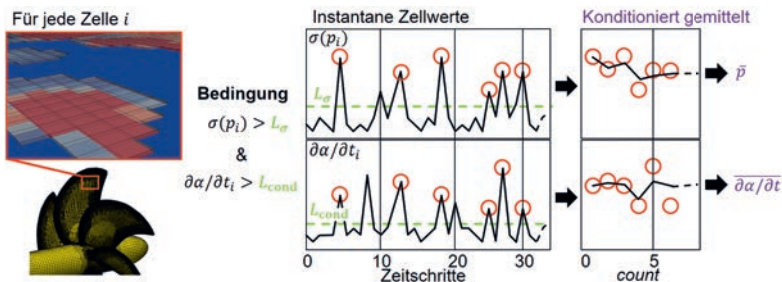


Abb. 2: Schematische Darstellung der wandzellen-basierten konditionierten Mittelung erosiver Strömungs-Ereignisse aus der Simulation.

## VALIDIERUNG

### 3.1 Vergleich der Methode „FaST“ mit Laborexperimenten.

Zwecks Validierung des weiterentwickelten Verfahrens „FAST“ wurden im Kavitationstunnel K23 der Universität Duisburg-Essen Versuche mit einem NACA 0015 Tragflügelprofil durchgeführt. Um in der Simulation möglichst ähnliche Strömungsbedingungen zu realisieren, wurde der Kavitationstunnel in der Simulation geometrisch abgebildet. Das numerische

Rechengitter wurde so erzeugt, dass der Tragflügel inklusive seiner Lagerung auf einer Welle und der Querschnitt der Messstrecke analog zum Versuch abgebildet werden konnten. Abbildung 3 zeigt das numerische Rechengebiet und Gitter an der Seite des Rechengebietes für einen Anstellwinkel des Tragflügels von  $10^\circ$ . Analog zum Versuch ist eine Flügelkante mit einer Welle verbunden, die aus der seitlichen Wand des Rechengebietes herausragt. Das andere Ende des Flügels wird frei umströmt.

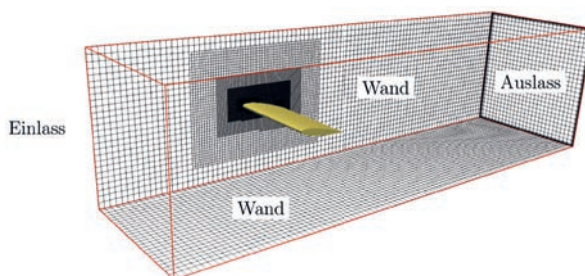


Abb. 3: Rechengebiet für NACA 0015 Tragflügelprofil in der Messstrecke des Kavitationstunnels K23 der UDE für einen Anstellwinkel von  $10^\circ$ .

Abbildung 4 zeigt Momentaufnahmen des Tragflügels schräg von oben für zwei vergleichbare Betriebspunkte bei einem Anstellwinkel von  $10^\circ$  im Experiment (links) und der Simulation (rechts). In beiden Fällen formierte sich die Wolkenkavitation nach der Ablösung von der Tragflügeloberfläche zu einer „Hufeisen“-Form. Auch die Kavitation an der Welle, auf der der Tragflügel gelagert war, und an der freien Flügelspitze konnte sowohl im Experiment als auch der Simulation festgestellt werden.

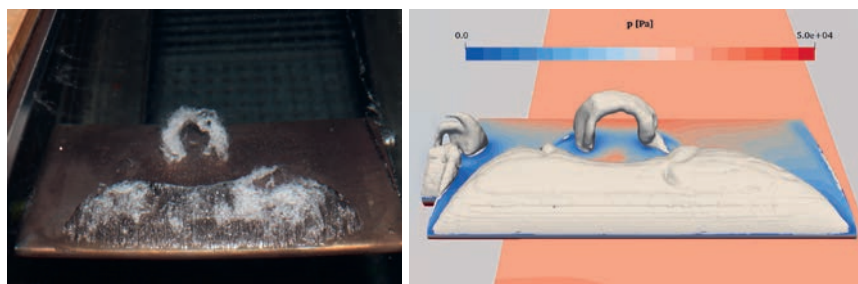


Abb. 4: Vergleich der Kavitationsgebiete am NACA 0015 Tragflügelprofil zwischen Experiment (links) und Simulation (rechts).

### 3.2 Erosionsvorhersage mit dem Verfahren „HiPT“

Das Erosionsmodell wurde auf zwei Testfälle mit aggressiver Kavitationserosion angewandt: die rotationsymmetrische Düse [7] und eine Ultraschall-Sonotrode, siehe Abbildung 5. Im ersten Testfall wird eine rotationssymmetrische Düsenströmung um einen 1mm Radius radial umgelenkt, wodurch Kavitationsgebiete entstehen, welche stromabwärts transportiert werden und die Bodenplatte bei einem Radius von  $r \sim 25\text{mm}$  erodieren. Die Sonotrode

hingegen besteht aus einem oszillierenden Kopf, welcher mit einer Frequenz von  $\sim 20\text{kHz}$  und peak-to-peak Amplitude von  $\sim 40\mu\text{m}$  ein Kavitationsgebiet erzeugt. Hierbei werden Kopf und die 1.5mm entfernte Gegenprobe durch das Kavitationsgebiet beschädigt, wobei ein dominanter Ring-Schaden am Kopf entsteht.

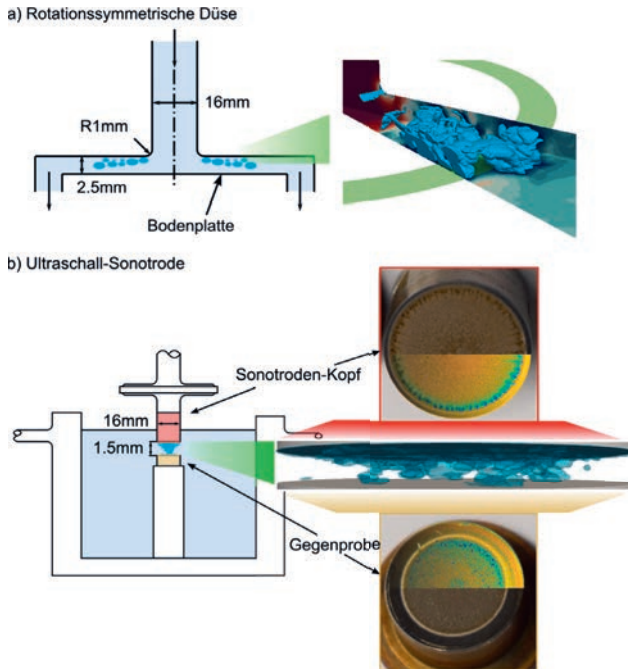


Abb. 5: a) Schematische Darstellung der rotationssymmetrischen Düse sowie eine Momentaufnahme des Kavitationsgebietes aus der Simulation (blau) [11]. Die beschädigte Ringzone der Bodenplatte ist grün markiert; b) Schematische Darstellung der Sonotrode mit einer Momentaufnahme des Kavitationsgebietes aus der Simulation innerhalb des Spaltes. Der Erosionsschaden auf Kopf und Gegenprobe nach 350 Minuten ist durch eine Fotografie und eine Erosions-Topographie-Karte abgebildet.

Die Ergebnisse des Erosionsmodells sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt. Die gemittelte Last  $\bar{\sigma}$  und die Belastungsrate  $\bar{N}$  sind mit Kalibrierungsparametern skaliert. Die Untersuchung der zwei Testfälle hat gezeigt, dass eine testfallabhängige Kalibrierung des Modells erforderlich ist. Für die rotationssymmetrische Düse wurden die Kalibrierungsparameter  $F_{\sigma} = 1,4$  und  $F_{cond} = 100$  so gewählt, dass die gemessene Abtragsrate von  $1,16\mu\text{m}/\text{h}$  und Inkubationszeit von 30h [7] bestmöglich an der höchsten bzw. niedrigsten Position abgebildet werden. Die resultierende Erosionstiefe nach 104h ergibt sich durch eine Verrechnung beider Erosionsergebnisse und ist in Abbildung 6c dargestellt. Es lässt sich eine gute Übereinstimmung mit der experimentellen Erosionstiefe feststellen. Die Position des maximalen Schadens ist um 1 mm verschoben, während das experimentelle Ergebnis einen schmalen Bereich aufweist.

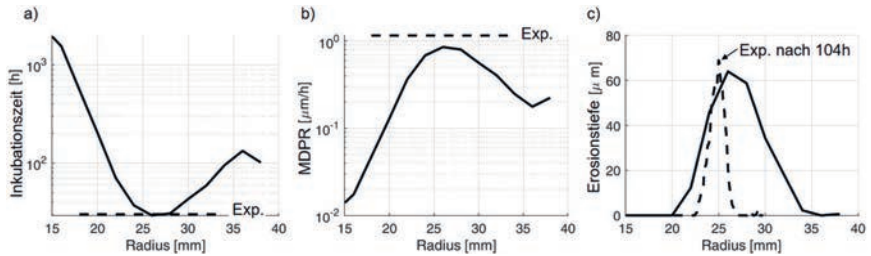


Abb. 6: Ergebnisse des Erosionsmodells für die rotationssymmetrische Düse: Radialer Verlauf der Inkubationszeit (a), der Abtragsrate (b) und der Erosionstiefe nach 104h (c). Die Ergebnisse des Experiments von Franc [7] sind gestrichelt dargestellt.

Die Ergebnisse für die Sonotrode sind in Abbildung 7 dargestellt. Zur Kalibrierung wurden die Parameter  $F_{\sigma}=1,4$  und  $F_{cond}=1$  verwendet. Der Verlauf der experimentell ermittelten Erosionstiefe wird vom Erosionsmodell gut vorhergesagt. Der dominante Ring-Schaden ist gut identifizierbar und ist um  $\sim 0,5\text{mm}$  versetzt im Vergleich zum Experiment, während eine Abnahme der Schädigung zur Mitte des Sonotrodenkopfes richtig vorhergesagt wird. Am äußersten Rand wird kein Schaden vorhergesagt.

Für die Sonotrodenköpfe und Gegenproben wurden im Rahmen des Projekts ebenfalls Erosions-Topographie-Karten gemessen [12], siehe Abbildung 7b. Da das beschriebene Erosionsmodell für jede Wandzelle individuell angewandt werden kann, ist hier exemplarisch als Vergleich, zusätzlich zum radialen Verlauf der Erosionstiefe, die räumliche Verteilung auf Basis der einzelnen Wandzellen dargestellt (Abbildung 7c). Dieser Schritt ist für die weitere Verwendung der Methode besonders für komplexere Geometrien von Vorteil.

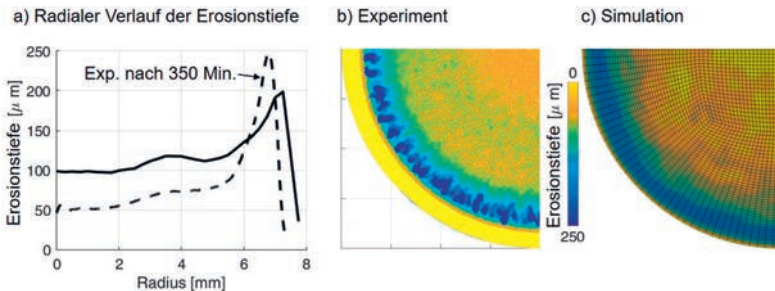


Abb. 7: Ergebnisse des Erosionsmodells für den Sonotrodenkopf: Umfangsgemittelter radialer Verlauf der Erosionstiefe nach 350 Minuten im Vergleich zur gemessenen Erosionstiefe (a); Gemessene Erosions-Topographie-Karte (b) im Vergleich mit dem Ergebnis des Erosionsmodells auf Basis der einzelnen Wandzellen der Simulation (c).

## 4. LEITANWENDUNGEN

### 4.1 Konventionelle Propellerentwürfe

Bei der MMG wurden zwei verschiedene Propellerentwürfe für ein modernes Containerschiff entworfen und mit FaST auf ihr Erosionsrisiko untersucht. Hierbei sollte einerseits überprüft werden, ob die Propellerentwürfe überhaupt erosionsgefährdet sind, und andererseits wie sich diese bzgl. der Erosionsgefahr voneinander unterscheiden. Die beiden Entwürfe zeichnen sich durch eine unterschiedliche Steigungs- und Wölbungsverteilung aus. Dies hat zur Folge, dass die Entwürfe bei ähnlicher Performance zu einer unterschiedlich starken Saugseitenkavitation neigen. Der Entwurf 1 ist nahe an die Seite zur Druckseitenkavitationsgrenze ausgelegt, der Entwurf 2 hat wesentlich mehr Sicherheit gegen Druckseitenkavitation. Die Propeller sind in einem vereinfachten numerischen Setup mit dem RANS-basierten FaST untersucht worden. Hierbei wird der komplette Propeller in einem zylindrischen Gitter simuliert, welches in einem stationären Gitter rotiert. Der Schiffsnachstrom strömt vereinfacht als nomineller Nachstrom in das stationäre Gitter ein. Dies hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Kontrollvolumen, zur Diskretisierung des Schiffsrumpfes, generiert werden müssen und somit der Rechenaufwand der Simulationen erheblich reduziert wird. Das numerische Setup entspricht in etwa einem Kavitationsversuch, bei dem die Strömung mit Hilfe von Gittern beeinflusst wird, um den axialen Schiffsnachstrom nachzubilden. Die Simulation beider Entwurfspropeller erfolgt im Großausführungsmaßstab für den Entwurfspropulsionspunkt.

In einer ersten Simulation wurde FaST mit den bekannten Werkstoffparametern der verwendeten CU3-Bronze angewandt. Durch die entstehende Kavitationsdynamik über den Flügelumlauf konnten bei beiden Propellerversionen keine Erosionsereignisse aufgezeichnet werden, da die für die Spannung und Kondensationsrate definierten Grenzwerte nicht überschritten wurden. Um trotzdem beide Propellerentwürfe hinsichtlich möglicher Erosionsgefahr vergleichen zu können, wurden die Grenzwerte ( $L_\sigma$  bzw.  $L_{(\partial\alpha/\partial t)}$ ) für die Last  $\sigma(p)$  und die Kondensationsrate  $\partial\alpha/\partial t$  im Erosionsmodell deutlich verringert. Damit lassen sich zwar keine Aussagen bzgl. des Erosionsabtrages über die Lebensdauer des Propellers postulieren, es ermöglicht jedoch dem Entwerfer festzustellen, welcher Entwurf bzgl. seiner Kavitationsdynamik eher zu Erosion neigt. Abbildung 8 zeigt die aufgezeichneten Erosionsereignisse und berechneten Kavitationsvolumen bei verschiedenen Flügelstellungen. Beide Entwürfe durchliefen die gleiche Anzahl an Propellerumdrehungen, so dass ein direkter Vergleich zwischen der Anzahl der Erosionsereignisse gezogen werden kann. Es zeigt sich, dass Entwurf 1, weniger zur Saugseitenkavitation neigt als Entwurf 2. Im Vergleich zu Entwurf 2, wird für Entwurf 1 eine größere Anzahl von Erosionsereignissen vorhergesagt. Diese beschränken sich auf einen kleinen Bereich der Fläche des gesamten Flügels. Für Entwurf 2 konnten deutlich größere Dampfvolmen auf der Saugseite des Propellers beobachtet werden. Auf der Flügelfläche wurde eine geringere Anzahl von Erosionsereignissen vorhergesagt, die auf eine größere Fläche verteilt waren.

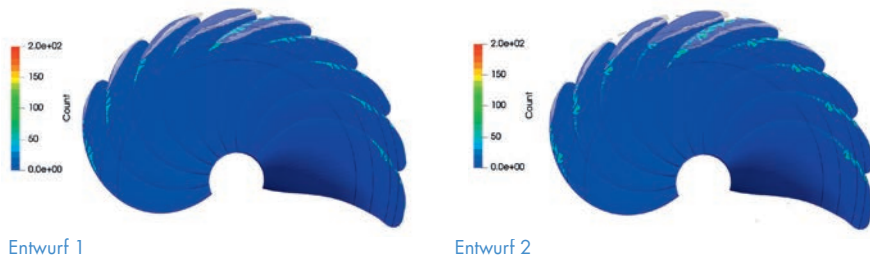


Abb. 8: Vorhersage von Kavitation und der Anzahl von Erosionsereignissen auf den Propellerflügeln mit dem FaST für zwei verschiedene Propellerentwürfe.

Abbildung 9 zeigt die Vorhersage der mittleren Materialabtragsrate (MDPR) mit FaST an einem Propellerflügel für die beiden Entwürfe. Für Entwurf 1 erkennt man an zwei konzentrierten Punkten der Hinterkante die höchsten Abtragsraten, welche durch das Kollabieren der Schichtkavitation kurz vor der Entstehung der Spitzenwirbelkavitation zu begründen sind. Für Entwurf 2 wurden an diesen Positionen keine solch hohen Werte für die mittlere Materialabtragsrate vorhergesagt.

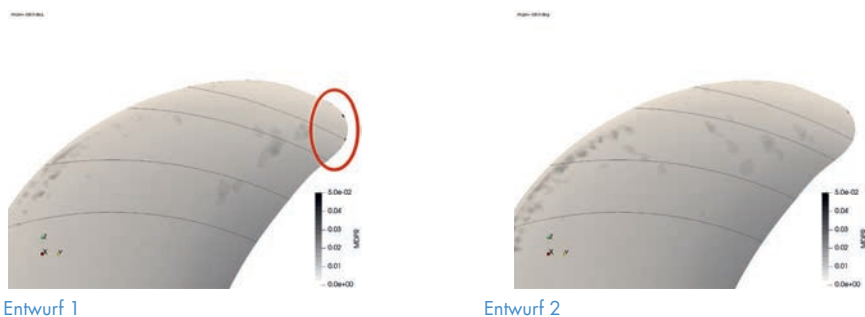


Abb. 9: Vorhersage der mittleren Abtragsrate (MDPR) in  $\mu\text{m}/\text{h}$  durch Kavitationserosion mit FaST für zwei verschiedene Propellerentwürfe.

#### 4.2 Voith Linear Jet

Der Voith Linear Jet ist ein Antrieb, der für den Betrieb von schnellen Schiffen konzipiert ist. Im Anwendungsfall in einem CTV (Crew Transfer Vessel) im Bereich Offshore Wind kommt noch der Off-Design-Betriebspunkt des Standschubs dazu (s. Abb. 10). Im Vorfeld wurde dazu eine Motorregelung vereinbart, die den für eine Geschwindigkeit von 32kn ausgelegten Antrieb bei Standschub nicht mit der vollen Leistung beaufschlagt, um somit ein ausgeprägtes Maß an Kavitation im Off-Design-Zustand zu vermeiden.



Abb. 10: Crew Transfer Vessel (CTV) unter Standschubbedingungen.

Diese Motorregelung blieb zu Beginn des Schiffsbetriebes jedoch infolge eines Missverständnisses inaktiv, so dass der Linear Jet die ersten Monate in einer Überlastsituation beim Standschub betrieben wurde. Bei einer Inspektion des Schiffes in der Winterpause wurden auf der Saugseite des Rotors Spuren von Kavitationserosion detektiert, deren Ursache in der zu hohen Last im Standschub zu suchen ist (siehe Abb. 13 (links)).

Da dieser Betriebspunkt hinsichtlich seiner Randbedingungen gut definiert ist, wurde dieser zur Validierung der im Vorhaben für das FaST entwickelten Erosionsmodelle herangezogen. Dazu wurde ein CFD-Simulationsmodell des CTVs erstellt. In Abbildung 11 ist die Organisation des Strömungsgebietes (links) sowie das Oberflächennetz der Schiffsektion um den Linear Jet (rechts) gezeigt.

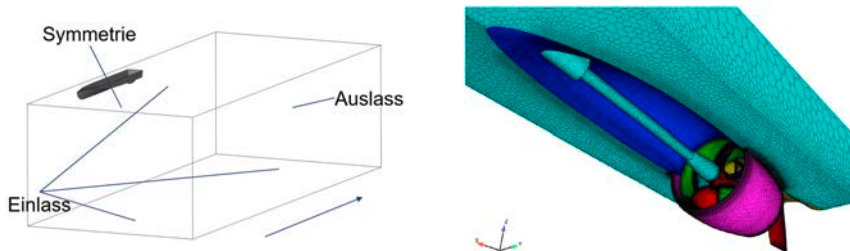


Abb. 11: Strömungsgebiet und Randbedingungen (links) und Oberflächengitter um Schiff und Anhänge (rechts) zur Simulation des Kavitationsverhaltens am Voith Linear Jet.

In der Nachbildung der Situation in der Großausführung wurde der Linear Jet im Standschub mit Nennleistung betrieben. Abb. 12 zeigt links die Geschwindigkeitsverteilung unter Standschubbedingungen in einer Ebene durch die Rotationsachse des Linear Jets. Rechts in der Abbildung ist die dynamische Druckverteilung samt Kavitationsgebieten (weiß) dargestellt



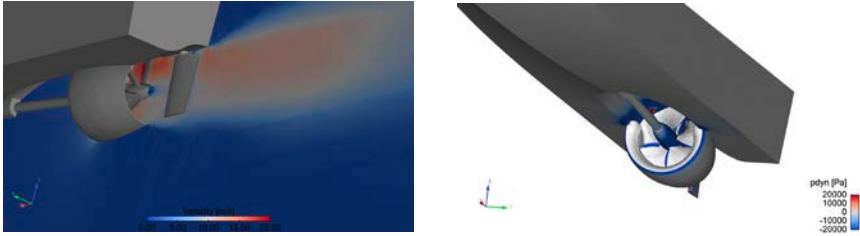


Abb. 12: Strömungsverhältnisse am Voith Linear Jet im Standschub bei Überlast.

Es ist deutlich zu erkennen, dass in diesem Betriebspunkt die gesamte Saugseite des Rotors Kavitation ausgesetzt war. Tatsächlich wurde eine erosive Schädigung des Blattes allerdings nur am äußeren Radius in der Nähe der Hinterkante festgestellt (vgl. Abb. 13 (links)). Daraus leitet sich der Bedarf ab, das Kavitationsgebiet hinsichtlich erosiver Teilbereiche zu bewerten.

In einem frühen Stadium des Vorhabens wurden von Voith zunächst vereinfachte Ansätze zur qualitativen Vorhersage von Erosion aus der Literatur angewendet. Diese werten lokale Zustände wie den Gradienten der Volumenfraktion oder des Drucks aus. Auswertungen dieser Erosionsfunktionen wurden anschließend mit tatsächlichen Schadensbildern verglichen. Dabei konnte keine der Funktionen die an den Propellerflügeln beobachtete Erosion vorhersagen. Diese Situation konnte mit dem im Vorhaben entwickelten Modell signifikant verbessert werden. Abbildung 13 zeigt den tatsächlichen Schaden aus dem Referenzfall (links) im Vergleich mit den Ergebnissen aus der Simulation mit FaST (rechts). In diesem Fall werden der Ort sowie die Ausdehnung korrekt wiedergegeben und stellt somit einen enormen Mehrwert im Rahmen der Entwicklung von Antriebssystemen dar.

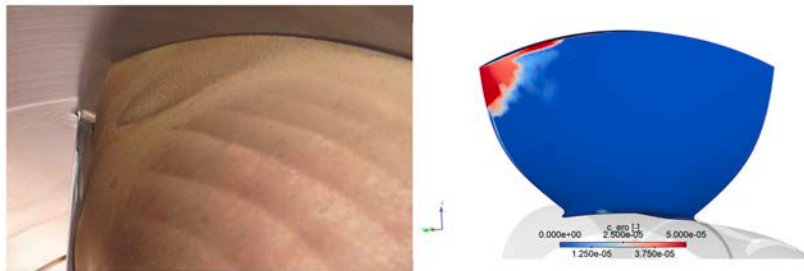


Abb. 13: Erosionsschaden am Voith Linear Jet durch Standschub (links) und Vorhersage der Erosionswahrscheinlichkeit mit FaST (rechts).

#### 4.3 Propeller eines Containerschiffes

Als weitere Leitanwendung diente die durch Kavitation hervorgerufene Erosion an einem konventionellen Propeller eines Containerschiffes. Basierend auf den Betriebsdaten verschiedener baugleicher Schiffe konnten die Projektpartner MMG und UDE gemeinsam einen Betriebspunkt ermitteln, bei dem potenziell erosive Kavitation entstanden ist. Für eine

Erosionsvorhersage mit FaST wurde dazu an der UDE die kavitierende Strömung um das gesamte Schiff mit Propeller und Ruder simuliert. Abbildung 14 zeigt das numerische Gitter im Hinterschiffsbereich (links) und auf den Propellerflügeln (rechts), welches insbesondere an den Propellerflügeln, deren Wurzeln und Spitzen, verfeinert wurde.

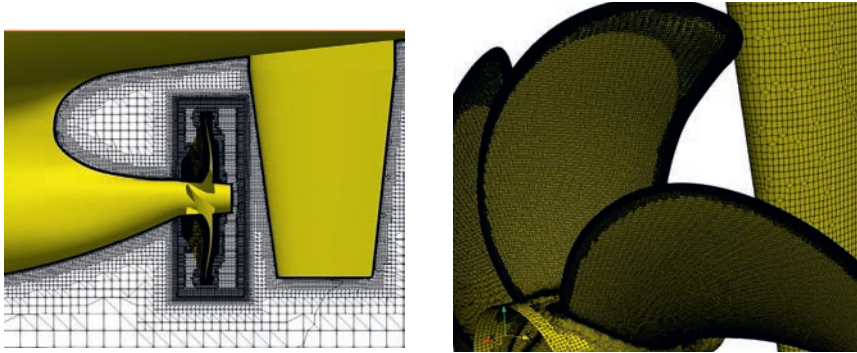


Abb. 14: Numerisches Gitter am Hinterschiffsbereich (links) und auf den Propellerflügeln (rechts).

Der untersuchte Betriebspunkt wurde vom "Slow Steaming"-Betriebspunkt abgeleitet, indem davon ausgegangen wurde, dass eine höhere Schubbelastung des Propellers durch eine erhöhte Drehzahl und verringerte Anströmgeschwindigkeit zustande kam. Abbildung 15 zeigt die Druckverteilung (links) und das Dampfvolumen (rechts) auf der Saugseite der Propellerflügel. Es lässt sich erkennen, dass sich die Druckverteilung während einer Propellerrotation verändern, so dass Kavitationsblasen wachsen und nahe der wieder kollabieren.

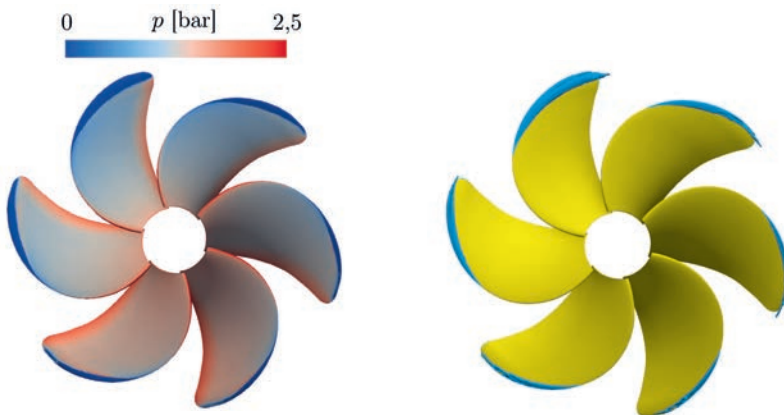


Abb. 15: Druckverteilung (links) und Dampfvolumen (rechts) auf der Saugseite der Propellerflügel.

Basierend auf der Strömungssimulation mit FaST wurde eine Erosionsvorhersage nach dem oben beschriebenen Ansatz vorgenommen. Dazu konnte die Materialabtragsrate (MDPR) für alle Wandzellen auf den Propellerflügeln ermittelt werden. Abbildung 16 zeigt das durch Kavitationserosion hervorgerufene Schadensbild am Propeller des Containerschiffes (links) und die mit FaST vorhergesagte MDPR in  $\mu\text{m}/\text{h}$  aus der Simulation (rechts). Mit FaST wurde Erosion an den Bereichen der Flügelspitze vorhergesagt, an denen Kavitationsgebiete

anwachsen und kollabierten. Die entwickelte Methode konnte die Erosion am Containerschiffspropeller mit guter Übereinstimmung vorhersagen.

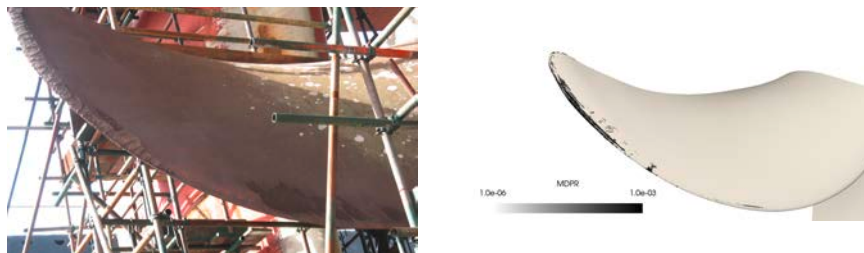


Abb. 16: Erosionsschaden am Propeller eines Containerschiffes (links) und mit FaST vorhergesagte Abtragsrate MDPR in  $[\mu\text{m}/\text{h}]$  (rechts).

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Verbundvorhaben Kav4D wurde eine Strömungs-Erosions-Kopplungsmethode entwickelt, mit Hilfe dessen das Lastkollektiv an der Struktur berechnet wird. Mit dem Erosionsmodells kann dann der Zeitpunkt des Eintretens und der zeitliche Verlauf von Erosion analysiert werden. Im Gegensatz zu existierenden Erosionsmodellen [13,14] verwendet die hier entwickelte Methode tatsächliche Werkstoffparameter und liefert statistische Informationen über Inkubationszeit und Materialabtrag. Die Testfallabhängigkeit des Erosionsmodells wird mit der Hilfe von Kalibrierungsparametern für die mittlere Spannung und Kondensationsrate korrigiert. Zur Validierung der Methode „Fast Solution Tool“ wurden detaillierte Vergleiche mit dem „High Precision Tool“ hinsichtlich Strömung und Erosionsvorhersage vorgenommen. Das Erosionsmodell wurde im Rahmen des Projektes in die Softwareumgebungen der Projektpartner Voith und MMG implementiert. Die entwickelten Methoden bieten als Ergänzung zum Modellversuch die Möglichkeit, Propellerentwürfe hinsichtlich potenzieller Kavitationserosion zu untersuchen. Daraus folgt eine deutliche Verbesserung des Entwurfsprozesses und der daraus entstehenden Propellerentwürfe.

## DANKSAGUNG

Die Projektpartner bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Bereitstellung der Fördermittel und beim Projektträger Jülich für die fachliche und organisatorische Betreuung.

Die Simulationen wurden mit dem Großrechner der Universität Duisburg-Essen durchgeführt, sowie mit Rechenressourcen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen unter dem Projekt bund0012.

Die Autoren bedanken sich beim Gauss Centre for Supercomputing e.V. ([www.gauss-centre.eu](http://www.gauss-centre.eu)) für die Bereitstellung von Rechenzeit durch das John von Neumann Institute for Computing (NIC) auf dem GCS Supercomputer JUWELS [15] am Jülich Supercomputing Centre (JSC).

## LITERATUR

- [1] Schmidt, S.J., Sezal, I.H., Schnerr, G.H., Talhamer, M., 2008. Riemann Techniques for the Simulation of Compressible Liquid Flows with Phasetransition at all Mach numbers - Shock and Wave Dynamics in Cavitating 3-D Micro and Macro Systems, in: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- [2] Schnerr, G.H., Sezal, I.H., Schmidt, S.J., 2008. Numerical investigation of three-dimensional cloud cavitation with special emphasis on collapse induced shock dynamics. *Physics of Fluids*, 20, 040703. doi: 10.1063/1.2911039.
- [3] Sauer, J., Schnerr, G. H., 2000. Unsteady Cavitating Flow - a New Cavitation Model Based on Modified Front Capturing Method and Bubble Dynamics. In: Proceedings of FEDSM, 4th Fluids Engineering Summer Conference.
- [4] Haese, M., Schreiner, F., Skoda, R., 2021. Evaluation of compressible and incompressible 3D flow solution methods for the assessment of cavitation erosion in ultrasonic erosion devices CAV2021. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Cavitation.
- [5] Yu, H., Goldsworthy, L., Brandner, P. A., Garaniya, V., 2017. Development of a compressible multiphase cavitation approach for diesel spray modelling. In: *Applied Mathematical Modelling* 45, S. 705–727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2017.01.035>. – DOI 10.1016/j.apm.2017.01.035. – ISSN 0307904X.
- [6] Yuan, C., Song, J., Liu, M., 2019. Comparison of compressible and incompressible numerical methods in simulation of a cavitating jet through a poppet valve. In: *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 13, Nr. 1, S. 67–90.
- [7] Franc, J.P., 2009. Incubation time and cavitation erosion rate of work-hardening materials. *Journal of Fluids Engineering*, 131, 0213031–02130314. doi: 10.1115/1.3063646.
- [8] Dular, M., Stoffel, B., Širok, B., 2006. Development of a Cavitation Erosion Model. *Wear*, 261, 642–655, doi: 10.1016/j.wear.2006.01.020.
- [9] Joukowsky, N., 1898. Über den hydraulischen Stoss in Wasserleitungsröhren. (on the hydraulic hammer in water supply pipes). *Mémoires de l'Académie Impériale des Sciences de St.-Petersbourg* (1900) 9, 1-71.
- [10] Plesset, M.S., Chapman, R.B., 1971. Collapse of an Initially Spherical Vapor Cavity in the Neighborhood of a Solid Boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 47, 283–290, doi: 10.1017/S0022112071001058.
- [11] Peters, A., 2020. Numerical Modelling and Prediction of Cavitation Erosion Using Euler-Euler and Multi-Scale Euler-Lagrange Methods. Duisburg, Germany, University of Duisburg-Essen, PhD Thesis.
- [12] Schreiner, F., Hanke, S., Skoda, R., 2021. Assessment of flow aggressiveness and erosion damage topography for different gap widths in ultrasonic cavitation testing, *Wear*, 484–485, 203989. doi: 10.1016/j.wear.2021.203989.

- [13] Hasuike, N., Yamasaki, S., Ando, J., Okazaki, A., 2011. Numerical Study on Cavitation Erosion Risk of Marine Propellers Operating in Wake Flow. *Journal of JIME* Vol. 46, 79–87.
- [14] Peters, A., Lantermann, U., El Moctar, O., 2015. Numerical Modelling and Prediction of Erosion Induced by Hydrodynamic Cavitation, in: *Journal of Physics: Conference Series* 656. Presented at the 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015), Lausanne, Switzerland.
- [15] Jülich Supercomputing Centre, JUWELS, 2019. Modular Tier-0/1 Supercomputer at the Jülich Supercomputing Centre, *J. Large-scale Res. Facil.* 5 (A135) <http://dx.doi.org/10.17815/jlsrf-5-171>.



# PRS GYRO –

PUBLIC REGULATED SERVICE GYRO

## AUTOREN

<b>DIRK KOWALEWSKI</b>	NAVXPERIENCE GMBH, BERLIN
<b>DR ERTAN GÖKLÜ</b>	DSI DATENSICHERHEIT GMBH, STUHR
<b>PRIYANKA PRIADARSHINI</b>	DSI DATENSICHERHEIT GMBH, STUHR
<b>RAZA JAVED</b>	DSI DATENSICHERHEIT GMBH, STUHR
<b>DR. ULRICH MANGOLD</b>	RAYTHEON ANSCHÜTZ GMBH, KIEL

## MOTIVATION

Galileo ist ein unabhängiges globales Satellitenortungssystem, das von Europa beherrscht wird und eine Vielzahl von Diensten für Nutzer gewährleistet, die mit Galileoverträglichen Satellitenortungsempfängern ausgestattet sind. Galileo ist ein ziviles System, das auch einen robusten Dienst anbietet, dessen Zugang reguliert wird. Dieser Dienst heißt Galileo Public Regulated Service (Galileo PRS).

Der Galileo PRS soll von hoheitlichen Nutzergruppen wie Polizei, Grenzschutz und Küstenwachen aber auch Feuerwehren und Rettungsdiensten eingesetzt werden. Eine Ausdehnung auf Nutzer, die essentielle Infrastrukturen betreiben, gefährliche Güter oder Menschenmassen transportieren, wird erwogen. Im maritimen Bereich gehören hierzu Öl- und Gastransport- sowie Kreuzfahrtschiffe, aber auch Hafenbetreiber. Andere Beispiele im nicht-maritimen Bereich sind Energieversorger, Bahn- und Fluggesellschaften. Schließlich wird eine militärische Nutzung erwartet.

Der PRS bietet einen höheren Schutz vor Bedrohungen (/1/, /2/, /3/) für das von den Galileo-Satelliten abgestrahlte Raumsignal durch den Einsatz von hochentwickelten zweckdienlichen Technologien zur Abschwächung von Interferenzeffekten sowie Ablehnung von nachgemachten Raumsignalen, um somit die Dienstverfügbarkeit zu erhöhen. Dazu werden die PRS-Ortungssignale nach Verschlüsselung in den Satelliten auf zwei Trägerfrequenzen, 1575,42 und 1278,75 MHz, moduliert und kontinuierlich ausgestrahlt. Die modulierten PRS-Ortungssignale sind Breitbandsignale, so dass unabsichtliche Interferenz oder arglistige Störer einen geringeren Anteil dieses Nutzsignals beeinträchtigen können.

Der Zugang zum Galileo PRS wird reglementiert durch nationale europäische Behörden. Diese Behörden beaufsichtigen und lenken die Nutzer des Galileo PRS, die Herstellung und Verbreitung der PRS-kompatiblen Galileo-Empfänger sowie die Verteilung der Schlüssel zur Erzeugung von PRS-Korrelationsignalen im zugelassenen Empfänger.

Hauptmotivation für den vorliegenden Projektantrag ist die weitere Erhöhung der Gefahrlösigkeit der Hochseeschifffahrt, indem ihr wichtigstes System zur Navigation – der Kreiselkompass – für die eingangs erläuterten kritischen Anwender und Missionen mit Hilfe von Fahrtfehlerkorrekturen, deren Eingangsdaten von Galileo PRS bereitgestellt werden, noch betriebssicherer ausgelegt wird. Analoges gilt für die ARPA (Automatic Radar Plotting Aid) im True Motion-Mode, das AIS (Automatic Identification System) sowie die ECDIS (Electronic Chart Display and Information System, /4/) als hauptsächliches Werkzeug für die Routenplanung.

## ZIELE

Ziel des Vorhabens ist das Design bzw. die Funktionserweiterung von Komponenten, so dass letztendlich ein Strapdown-Kreiselkompass weltweit und zu jeder Zeit einen hochgenauen, vertrauenswürdigen Kurswinkel mit höchstmöglicher Verfügbarkeit und Unterbrechungsfreiheit berechnet und ausgibt. Somit ergeben sich die folgenden Teilprojekte bzw. Projektziele:

- › Entwurf eines Dekodiermoduls, das eine Korrelation mit den verschlüsselt empfangenen Ortungssignalen des Galileo PRS ermöglicht, so dass die daraus gewonnenen Entfernungen zu den Galileo-Satelliten sowie Galileo-Konstellationsdaten im Galileo-Hostempfänger zur vertrauenswürdigen Nutzerposition verrechnet werden können;
- › Modifikation eines existierenden Mehrsystem- und Mehrfrequenzempfängers, um das Dekodiermodul aufnehmen zu können, so dass schließlich ein Galileo PRS-Empfänger vorliegt, der in eine Vielzahl von Host-Systemen eingebaut werden kann;
- › Integration des Galileo PRS-Empfängers mit einem modernen Strapdown-Kreiselkompass, der die folgenden Erweiterungen erhält:
  - Verrechnung der vom Galileo PRS-Empfänger erhaltenen verlässlichen Positionen und Geschwindigkeiten zur Kompass-Fahrtfehlerkorrektur;
  - Erweiterung der Signalverarbeitung im Kreiselkompass, so dass der Kompass bei fehlender Positions- und Geschwindigkeitsstützung die Fahrtfehlerkorrektur selbst schätzt und weiterhin einen genauen und glaubwürdigen Kurswinkel ausgibt;
  - Nochmalige Erweiterung der Kompasssignalverarbeitung, um die Singularität der Kurswinkelberechnung am Nord- und am Südpol der Erde zu überwinden.

Die Erreichung dieser Ziele soll durch eine enge Zusammenarbeit der Projektpartner erfolgen. Sie ergänzen sich in idealer Weise, da sie die erforderliche Expertise in den notwendigen unterschiedlichen Disziplinen einbringen.



Nach Erreichen der Ziele des Vorhabens wird die Vertrauenswürdigkeit, Verfügbarkeit sowie letztendlich Sicherheit der Navigation eines Schiffes bedeutend erhöht, denn:

- › Die zugrundeliegende Satellitenortung ist vor jeglicher Manipulation durch Nutzung nicht bekannter, d. h. verschlüsselter Ortungssignale geschützt.
- › Strapdown-Kreisellkompass berechnen dann einen vollkommen zuverlässigen und genauen Kurswinkel.
- › Nachgeschaltete Autopiloten für die konventionelle Kurs- und Bahnregelung (/5/) sowie zukünftige selbstnavigierende Schiffe arbeiten daher mit abgesicherten Eingangsmessdaten für ihre Beobachter.

### OSR-PRS: OPEN SOURCE RECEIVER MIT GALILEO PRS

Die Aufgabe von navXperience ist die Entwicklung eines Galileo PRS-fähigen GNSS-Empfängers. Das Galileo PRS-Signal wird auf zwei Frequenzen von den Galileo-Satelliten gesendet. Das E1-Band, auf dem auch die frei verfügbaren Signale gesendet werden, sind schon vom zivilen Frontend des GNSS-Empfängers abgedeckt. Da die Galileo PRS-Signale auf dem E6-Band genutzt werden sollen, musste zunächst das Frontend überarbeitet werden. Die erste Hürde war, einen Sicherheitsbescheid zu bekommen, um an alle notwendigen Informationen zu gelangen. Abbildung 1.1 zeigt die Frequenzbänder von GPS, GLONASS und Galileo.

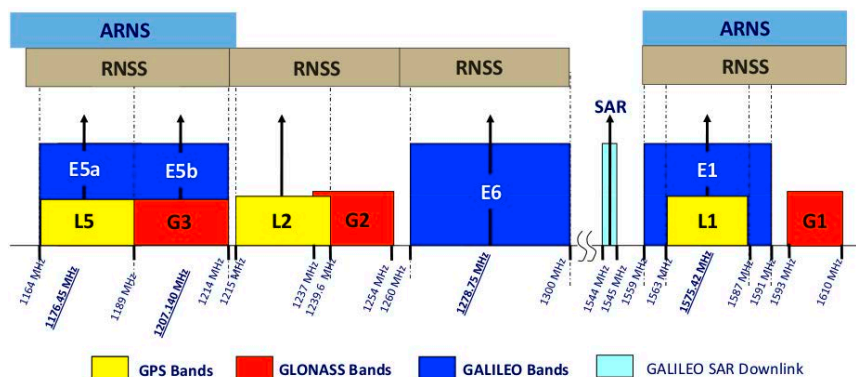


Abb. 1.1 Frequenzbänder von GPS, GLONASS und Galileo

Im nächsten Schritt wurde ein Filter entwickelt, das das Frontend auf die notwendige Datenmenge reduziert, aber trotzdem die volle Bandbreite empfängt. Diese Entwicklung wurde in enger Abstimmung mit DSI Datensicherheit realisiert. Die gefilterten, verschlüsselten Rohdaten werden an das Dekodierungsmodul von DSI Datensicherheit übermittelt.

Um die entschlüsselten Daten weiterzuverarbeiten, waren umfangreiche Algorithmen- und Softwareentwicklungen notwendig. Im ersten Schritt wurde als Datenprotokoll das auf Jason

basierende OSRP (Open Source Receiver Protocol) festgelegt, so dass Positionskoordinaten in Abhängigkeit von der GNSS-Zeit berechnet werden können. Um auszuschließen, dass der Galileo PRS-Empfängerprototyp Schaden nimmt, wurden in der Firmware noch Sicherheitsprogramme implementiert. Die Prozessorleistung und die Temperatur des Empfangssystems werden überwacht, für die Speicherkapazität der SD-Karten und Festplatten wurden Obergrenzen eingeführt und schließlich erfolgt eine automatische Löschung alter Dateien. Während der Projektlaufzeit hatte DSI Datensicherheit permanenten Zugriff auf den Verwaltungsserver von navXperience für das OSR-Format sowie auf einen LINUX Rechner zur Speicherung der E6-Rohdaten. Zur Vorbereitung der für den Projektabschluss geplanten Messfahrt wurde noch die RINEX- und die OSRP-Datenaufzeichnung an die dortigen Anforderungen angepasst.

Die Messfahrt fand am 12. August 2021 in Berlin statt. Hierfür wurde von navXperience eine zehn Meter lange Motoryacht gechartert. Der Strapdown-Kreisellkompass von Raytheon Anschütz erhielt in Echtzeit NMEA-Daten vom GNSS-Empfänger von navXperience. Gleichzeitig wurden L1- und L2-Rohdaten von GPS und GLONASS sowie E1-Rohdaten von Galileo aufgezeichnet, Protokolldateien geschrieben, OSRP-Daten gespeichert und RINEX-Daten aufgezeichnet. Leider war eine Echtzeitdatenauswertung der E6-Signale nicht möglich, da sie aus Sicherheitsgründen vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) nicht erlaubt wurde. Die endgültige Auswertung war bis zum Redaktionsschluss des Tagungsbandes nicht möglich. Über diese Ergebnisse kann daher erst auf der Tagung berichtet werden.

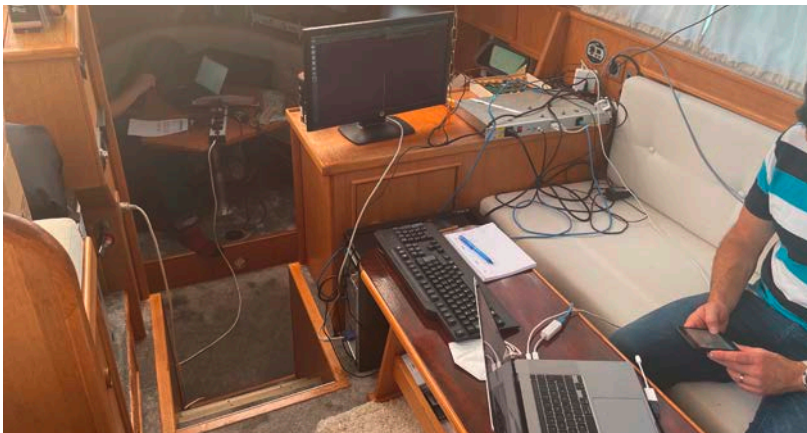


Abb. 1.2 Technikaufbau während der Testfahrt

## DESIGN GALILEO PRS DEKODIERUNGSMODUL

### Einführung

Für die Extraktion von GNSS-Navigationsdaten, muss das heruntergemischte Basisbandsignal, inklusive einer eventuell vorhandenen Zwischenfrequenz, in der Regel signaltechnisch in zwei Funktionsblöcken bearbeitet werden (siehe Abbildung 1). Der Akquisitions-Block

dient im Wesentlichen der Suche nach Satelliten, die innerhalb des Sichtbereiches des Empfängers liegen und der Ermittlung der Codephase und Dopplerverschiebung in Bezug auf ein lokal generiertes Referenzsignal. Anschließend erfolgt im Tracking-Block die Feinkorrektur der Dopplerverschiebung, die Ermittlung der Trägerphase und die Extraktion der Navigationsbits.

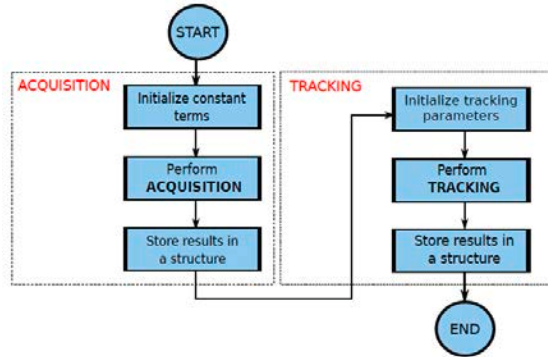


Abb. 2.1: Allgemeine Signalverarbeitungskette für GNSS Signale

### E6 PRS-Signalspezifikationen

In dieser Arbeit wurden PRS-Testdaten von einem Spirent Signal Generator verwendet, wobei die Abtastrate 81 MHz beträgt. Das Galileo E6A PRS-Signal setzt sich aus der PRN Sequenz, Navigationsdaten und dem Binary Offset Carrier (BOC) zusammen. Hierbei beträgt die BOC-cos Modulation (10,5) mit einer Subcarrier-Frequenz von 10 MHz und einer Chiprate von 5,115 Mcps.

### Prinzip der GNSS-Signalverarbeitung

Im ersten Schritt der Signalverarbeitungskette wird der auf Basisband transformierte Rohdatenstrom (inklusive einer 8,75 MHz Zwischenfrequenz) im Akquisition-Block bearbeitet. Dieser dient primär der Detektion von E6A-Satellitensignalen und der Identifikation der am Empfängerstandort zugänglichen Satelliten. Hierbei erfolgt durch eine Grobschätzung von Code-Phase und Dopplerfrequenz, wofür parallele Code-Phase Suchtechniken zur Anwendung kommen. Dies wird durch die parallele Anwendung von schnellen Fourier-Transformationen erreicht.

Im zweiten Schritt schließt sich an die Akquisition das Tracking an. Dieses hat mehrere Funktionen: (i.) die Verfeinerung der durch den Akquisitionsfunktionsblock gewonnenen Grobschätzungen der Code-Phase und Dopplerfrequenz, (ii.) die zeitliche Nachführung beider und (iii.), die Demodulation der Navigationsdaten der sichtbaren Satelliten.

Die zeitliche Nachführung besteht im Allgemeinen aus zwei zusammenwirkenden Rückkopplungsschleifen, einer DLL (Delay Lock Loop) für die Code-Nachführung und einer PLL (Phase Lock Loop) für die Frequenznachführung einer lokalen Nachbildung (Replika) des Trägersignals.

### Galileo E6 PRS-Akquisition

Zur Verarbeitung der E6 PRS-Signale wird eine lokale Replika erzeugt, die die PRN-Sequenz den Träger und Zwischenträger BOC enthält (10,5). Auch wenn das eingehende Signal im Basisband ist, kann evtl. eine kleine Frequenzkomponente im eingehenden Signal vorhanden sein, welche wie eine Dopplerfrequenz behandelt wird.

Die Erkennung dieser kleinen Frequenzkomponente erfolgt durch Multiplikation des Eingangssignals mit der Trägernachbildung. Dazu wird ein festgelegter Frequenzbereich in mehrere Bereiche unterteilt und dafür jeweils eine Trägernachbildung generiert. Hierdurch wird die Dopplerfrequenz mit einer Unsicherheit von  $\pm 50$  Hz bestimmt (Grob-schätzung). Durch die gleichzeitige Ermittlung der Code-Phase, wird das Start-Sample der PRN-Sequenz des empfangenen Signals determiniert.

### Galileo E6 PRS-Tracking

Die Tracking-Stufe verfügt über zwei Daten-Eingänge, über welche die Codephase und die Dopplerfrequenz aus der Vorbearbeitung in der Akquisitionsstufe eingelesen werden. Diese Daten werden von einer Phasenregelschleife (PLL) und einer Verzögerungsregelschleife (DLL) für die Weiterbearbeitung des PRS-Signals verwendet.

Die PLL dient dazu, die Phase der lokalen Trägernachbildung auf die Phase der Trägerkomponente im Eingangssignal abzustimmen ( $/10/$ ). Durch die Verwendung der in der Akquisitionsstufe ermittelten Dopplerfrequenz, entfällt eine Suche innerhalb eines festgelegten Frequenzintervalls, d. h. es entfällt die Notwendigkeit, mehrere Trägernachbildungen zu generieren. Somit erfolgt die Nachbildung des lokalen Trägers nur mit einer Frequenz. Zur Frequenzanpassung dient die Phasendifferenz zwischen lokalem und empfangenem Träger. Dieses Fehlersignal wird nach jedem Schleifendurchgang neu ermittelt, bis das Betragsquadrat der Amplitude des I-Anteils (reeller Ausgangsarm) maximal und die des Q-Anteils (Quadraturarm) minimal wird.

Die DLL Regelschleife ermöglicht die zeitliche Synchronisation der lokal erzeugten PRN-Sequenz mit der PRN-Sequenz des Eingangssignals. Dazu wird auf die in der Akquisitionsstufe gewonnene Code-Phase zurückgegriffen und das Start-Sample der PRN-Sequenz des Empfangssignals ermittelt. Die Berechnung der Abweichung (in Samples) des Startzeitpunkts der lokalen PRN-Replika von der empfangenen PRN-Sequenz bestimmt die Anzahl der Samples, die übersprungen werden müssen, um beide PRN-Sequenzen synchronisieren zu können. In der DLL-Regelschleife wird anschließend der für die Bearbeitung relevante Teil der empfangenen PRN-Sequenz verwendet.

Hier werden mehrere zeitversetzte Nachbildungen der PRN-Sequenz erzeugt, die sogenannten Very Early-, Early-, Prompt-, Late- und Very Late-Nachbildungen ( $/11/$ ,  $/12/$ ). Diese werden mit dem Eingangssignal multipliziert, die Korrelationsamplitude bestimmt und anschließend die Nachbildung mit der höchsten Amplitude ermittelt. Beide PRN-Sequenzen gelten dann als synchronisiert, wenn die DLL-Regelschleife für die Korrela-

tionsamplitude der Prompt-Nachbildung, im Vergleich zu den Amplituden der anderen Nachbildungen, den größten Wert liefert.

### Signalspezifische Modifikationen der Regelschleifen

Da sich das E6 PRS-Signal hinsichtlich der PRN-Länge und Modulationsverfahren von den Signalen der offenen Galileo-Dienste unterscheidet, war eine Anpassung der üblichen Trackingverfahren erforderlich. Dies betrifft insbesondere Typ und Design der Regelschleifen.

Als Beispiel ist hier die Signalverarbeitung der PRS E6-Testdaten mit den üblichen Regelschleifen (d. h. DLL und PLL) in Abbildung 2.2 gezeigt. Das zeitliche Verhalten und die Amplituden der Early-, Prompt- und Late-Korrelatoren und des DLL-Diskriminators zeigen ein schnelles Einrasten, was ein erfolgreiches Tracking nahelegen könnte: Der Prompt-Korrelator weist eine höhere Amplitude auf als die anderen Korrelatoren. Jedoch zeigen sich im Konstellationsdiagramm und im zeitlichen Verlauf der Amplitude des PLL Diskriminators, dass dies nicht der Fall ist. Hier sind zum einen vier Häufungspunkte zu erkennen; das E6-PRS Signal ist jedoch BPSK codiert. Außerdem dürfen nur zwei um  $180^\circ$  versetzte Häufungspunkte auf der I-Achse liegen (horizontal). Zum anderen zeigt der PLL-Diskriminator ein oszillatorisches Verhalten ohne erkennbare Dämpfung, d. h. es ist keine Konvergenz zu beobachten. Dies führt zu einer periodischen Phasenverstellung und somit zu einer periodischen FrequenzEinstellung der lokalen Nachbildung des Trägersignals. Dieser Fall wird als "False Frequency Lock" bezeichnet, also das Einrasten auf die falsche Trägerfrequenz.

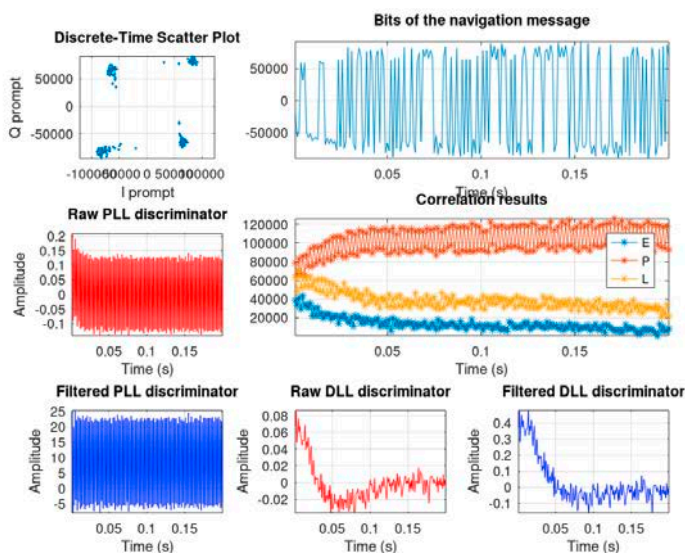


Abb. 2.2: Vermeintlich korrektes Tracking im False-Lock State

Eine Möglichkeit dies zu vermeiden, ist die Einführung einer FLL unterstützten PLL-Regelschleife (/13/). Dazu wird eine zusätzliche Frequenzregelschleife, die sogenannte FLL (Frequency Lock Loop) eingeführt, welche mit der PLL-Schleife zusammenschaltet ist. Hier wird die PLL ausschließlich zur Phasenkorrektur der lokalen Replika des Trägers verwendet, während die FLL für die Berechnung der Frequenzkorrektur zuständig ist. Somit werden in jeder Iteration über beide Regelschleifen zwei Diskriminatoren-Ausgaben erzeugt, welche zur Generierung der korrigierten Trägerfrequenz verwendet werden. Ein erfolgreiches Tracking mittels dieser Methode ist in Abbildung 2.3 gezeigt. Hierbei wurden dieselben Testdaten verwendet, die zu den in Abbildung 2.2 enthaltenen Ergebnissen geführt haben.

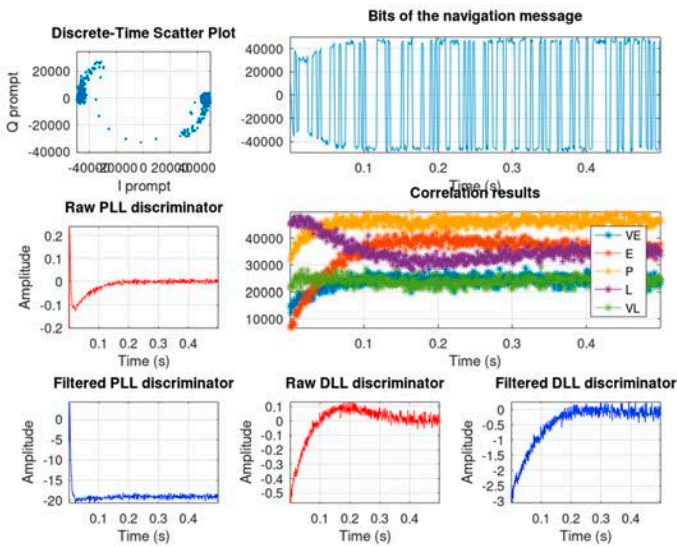


Abb. 2.3: Tracking der Testdaten mittels einer PLL unterstützt von einer PLL

Im Konstellationsdiagramm ist deutlich zu erkennen, dass das modifizierte Verfahren zu dem erwarteten Ergebnis führt, d. h. es treten zwei um  $180^\circ$  versetzte Häufungspunkte auf der I-Achse auf, was auf Grund der E6A PRS-Signalspezifikation zu erwarten ist. Im Gegensatz zum Verhalten, das in Abbildung 2.2 dargestellt ist, ist zudem eine Konvergenz der PLL-Diskriminatorwerte zu beobachten. Dies findet auch im Fall der DLL-Regelschleife statt, d. h. die lokale PRN-Nachbildung ist mit der empfangenen PRN-Sequenz des E6A-Signals zeitlich synchronisiert. Schließlich zeigen die Korrelatoren Very Early, Early, Promt, Late und Very Late, dass die Regelschleifen auf den korrekten Punkt einrasten und somit ein Einrasten auf eine Seitenflanke des BOC-modulierten E6 PRS-Signals vermieden wird. Mit der Verarbeitung der E6A-Testdaten konnte also gezeigt werden, dass die modifizierte Signalverarbeitungsalgorithmik in der Lage ist, die Navigationsdaten aus dem E6A-Rohdatenstrom auf korrekte Weise zu extrahieren.

## DESIGN HYBRIDSYSTEM

Vorwiegende Ziele des Teilvorhabens sind 1. die Integration des Galileo PRS-Empfängers mit dem Strapdown-Kreisellkompass sowie 2. die Implementierung neuartiger Funktionen im Kompass zur Erhöhung der Verfügbarkeit und Kontinuität der Ausgabe eines vertrauenswürdigen Kurswinkels.

### Auslegung, Aufbau und Feldtest des Hybridsystem-Demonstrators

Ziel von Raytheon Anschütz beim Feldtest des Hybridsystem-Demonstrators war der Nachweis der korrekten Echtzeitverrechnung im Strapdown-Kreisellkompass Standard 30 MF der von navXperience gesendeten GNSS-Positions- und -Geschwindigkeitsdaten. Dies trifft zu, denn Abbildung 3.1 zeigt einen „Heading status“ von eins bzw. wahr nach einer etwa fünfzehnminütigen Einschwingphase.

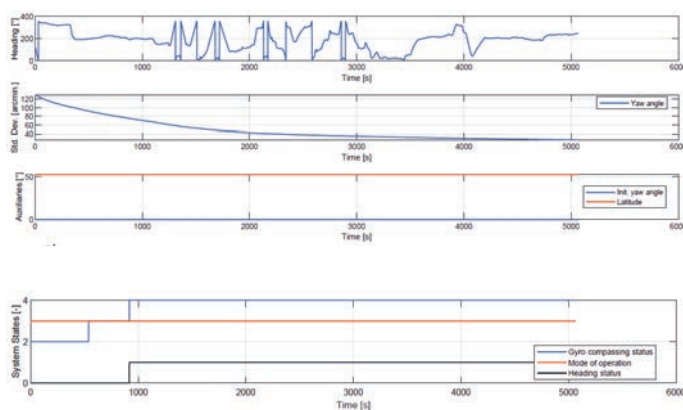


Abb. 3.1: Erwartet korrekte Funktion des Strapdown-Kreisellkompass Standard 30 MF

### Nichtsinguläre Kurswinkelbestimmung

Abbildung 3.2 vergleicht das Wanderazimut- mit dem nordorientierten Referenzsystem. Beide sind horizontalisiert. Bei letzterem wird die Nordrichtung immer mit der Nachführrate  $\rho_D$ , die sich aus der Ostgeschwindigkeitskomponente  $v_E$ , der geodätischen Breite  $\varphi$  sowie dem Erdradius  $R$  berechnen lässt, aufrechterhalten. Bei einer Polüberquerung müsste also eine Nachführung um  $\pm 180^\circ$  in unendlich kurzer Zeit erfolgen, was eine Unstetigkeit ist. Beim Wanderazimut-Referenzsystem hingegen entfällt diese Nachführung. Stattdessen wird der Richtungswinkel  $\alpha$  des Wanderazimut-Referenzsystems neben dem nun nicht nordbezogenen Kurswinkel als weiteres Zustandselement im nichtlinearen Systemdifferentialgleichungssystem des Strapdown-Kreisellkompasses bzw. -Inertialsystems mitgeführt.

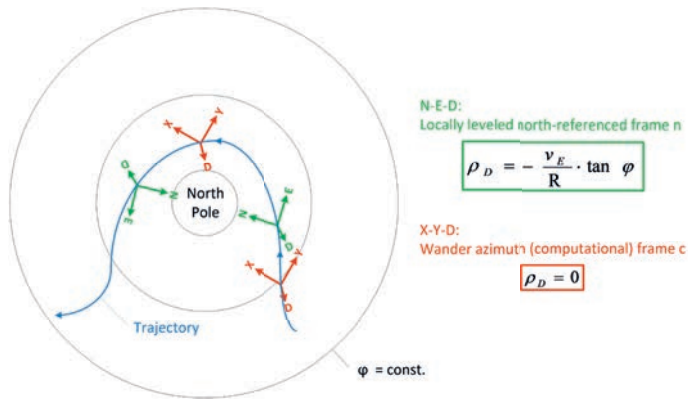


Abb. 3.2: Sogenanntes Wanderazimut- (rot) sowie nordorientiertes Referenzsystem (grün)

$$\frac{\epsilon_D(t)}{d_E} = -\frac{1}{\Omega_c} + \frac{\Omega_c \cdot \tan(\varphi)}{\omega_s^2 - \Omega^2}$$

$$\left[ \cos(\Omega \cdot t) \cdot \frac{\omega_s^2 \cdot [\omega_s^2 - \Omega^2 \cdot (3 - \cos^2(\varphi))] + \Omega_c^2 \cdot (\Omega^2 - 4 \cdot \Omega_c^2)}{\Omega_c^2 \cdot (\omega_s^2 - \Omega^2)} \right.$$

$$\left. + \cos(\omega_s \cdot t) \cdot \frac{\omega_s^2 + \Omega^2 + 4 \cdot \Omega_c^2}{\omega_s^2 - \Omega^2} \right.$$

$$\left. + t \cdot \sin(\omega_s \cdot t) \cdot \frac{\omega_s^2 + 2 \cdot \Omega_c^2}{\omega_s} \right]$$

$$\frac{\delta a(t)}{d_E} = \frac{\cos(\varphi)}{\Omega}$$

$$- \cos(\Omega \cdot t) \cdot \frac{((\omega_s^2 - \Omega^2)^2 - 4 \cdot \Omega^2 \cdot \Omega_c^2) \cdot \cos(\varphi)}{\Omega \cdot (\omega_s^2 - \Omega^2)^2}$$

$$- \cos(\omega_s \cdot t) \cdot \frac{4 \cdot \Omega_c^2 \cdot \Omega_c}{(\omega_s^2 - \Omega^2)^2}$$

$$- t \cdot \sin(\omega_s \cdot t) \cdot \frac{2 \cdot \Omega_c^2 \cdot \Omega_c}{\omega_s \cdot (\omega_s^2 - \Omega^2)}$$

Definitionen mit Erddrehrate  $\Omega$  und Erdschwere  $g$ :

$$\Omega_c \triangleq \Omega \cdot \cos \varphi$$

$$\Omega_s \triangleq \Omega \cdot \sin \varphi$$

$$\omega_s \triangleq \sqrt{g/R} \quad (\text{Schuler-Kreisfrequenz})$$

Abb. 3.3: Kurswinkel- (links) und Richtungswinkelfehler (rechts) beim nordorientierten bzw. Wanderazimut-Referenzsystem

Aus den nichtlinearen Systemdifferentialgleichungen für beide Koordinatensysteme lassen sich lineare Fehlerdifferentialgleichungssysteme ableiten, die sich für stationäre Bedingungen mit Hilfe von Matlab™ sogar analytisch lösen lassen. Der linke Teil in Abbildung 3.3 zeigt den am Nord- und Südpol singulären (Division durch  $\Omega_c$  im ersten Term auf der rechten Seite der Gleichung) Kurswinkelfehler  $\epsilon_D(t)$  verursacht durch die Ostkomponente der Kreiselbiase  $d_E$  beim Fall des nordorientierten Referenzsystems. Im rechten Teil von Abbildung 3.3 ist der entsprechende nichtsinguläre (Division durch die konstante Erddrehrate  $\Omega$  im ersten Term auf der rechten Seite der Gleichung) Richtungswinkelfehler  $\delta a(t)$  des Wanderazimut-Referenzsystems dargestellt.



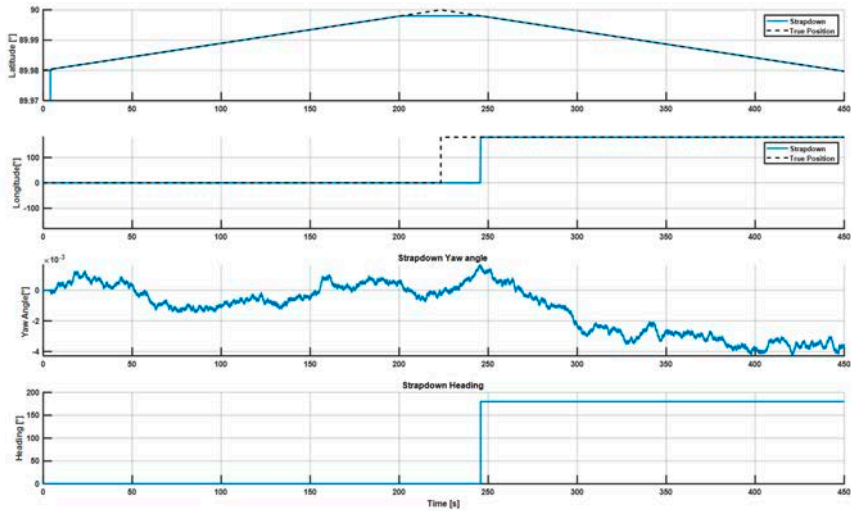


Abb. 3.4: Nichtsinguläre Kurswinkelbestimmung, Fahrt über den Nordpol

In Abbildung 3.4 ist das Ergebnis einer simulierten Fahrt über den Nordpol für den anschaulichen Fall  $\alpha \triangleq 0$  visualisiert. Die Graphen stellen die Extrahierung von geodätischer Länge und Breite sowie des nordorientierten Kurswinkels aus den Transformationsmatrizen bzw. quaternionen des Wanderazimut-Referenzsystems dar. Der dritte Graph von oben zeigt den zeitlichen Verlauf des auf das Wanderazimut-Referenzsystem bezogenen Kurswinkels, der keinen Sprung aufweist. In Polnähe ist die Umrechnung in die anschaulichen Größen geodätische Länge und Breite sowie nordorientierten Kurswinkel nicht mehr eindeutig, d. h. singular, und eine Größe muss festgehalten werden. In Abbildung 3.4 ist dies die geodätische Breite mit bzw. ab  $89,9975^\circ$ . Dieses Festhalten zieht eine verzögerte korrekte Ausgabe der geodätischen Länge und des nordorientierten Kurswinkels nach sich. Die Träger der exakten Positions- und Kurs-/Lageinformationen – weltweit und somit auch über dem Nord- und dem Südpol – sind die nichtsingulären Transformationsmatrizen bzw. -quaternionen, hinter denen sich einerseits die geodätische Länge und Breite sowie der Richtungswinkel  $\alpha$  und andererseits die auf das Wanderazimut-Referenzsystem bezogenen Eulerwinkel verbergen.

### Eigenschätzung der Fahrtfehlerkorrektur

Üblicherweise ist beim Strapdown-Kreisellkompass das Differentialgleichungssystem für die Transformationsmatrix  $\underline{C}_{nb}(\phi, \theta, \psi) \triangleq \underline{R}_z(-\psi) \cdot \underline{R}_y(-\theta) \cdot \underline{R}_x(-\phi) - \phi, \theta$  und  $\psi$  sind hier die Eulerwinkel des Schiffes, also sein Roll-, Nick- und Kurswinkel und  $\underline{R}_j(\chi), j \in \{x, y, z\}$  ist eine Elementardrehung um die Achse  $j$  mit dem Winkel  $\chi$  - zwischen dem schiffsfesten Koordinatensystem  $b$  und dem erdfesten -system  $n$  mit den positiven Achsrichtungen Nord (North), Ost (East) und Unten (Down) zu lösen (/6/, /7/):

$$\underline{\underline{C}}_{nb} = \underline{\underline{C}}_{nb} \cdot \underline{\underline{\Omega}}_{nb}^b = \underline{\underline{C}}_{nb} \cdot \left( \underline{\underline{\Omega}}_{ib}^b - \delta \underline{\underline{\Omega}}_{ib}^b \right) - \underline{\underline{\Omega}}_{in}^n \cdot \underline{\underline{C}}_{nb} = \underline{\underline{C}}_{nb} \cdot \underline{\underline{\Omega}}_{ib}^b - \left( \underline{\underline{\Omega}}_{ie}^n + \underline{\underline{\Omega}}_{en}^n + \delta \underline{\underline{\Omega}}_{ib}^n \right) \cdot \underline{\underline{C}}_{nb}$$

Beachte, dass beispielsweise  $\underline{\underline{\Omega}}_{nb}^b$  die schiefsymmetrische Darstellung des Drehratenvektors  $\underline{\omega}_{nb}^b$  ist. Da die drei orthogonalen Drehratensensoren des Strapdown-Kreisellkompass die Schiffsdrehungen fehlerbehaftet im schiffsfesten Koordinatensystem  $b$  relativ zum Inertialsystem  $i$  messen, d. h.  $\underline{\omega}_{ib}^b$ , müssen davon die Erddrehrate  $\underline{\omega}_e^n$ , die sogenannte Transportrate  $\underline{\omega}_n^n$  ( $/8/$ ) sowie die Fehler der Drehratensensoren  $\delta \underline{\omega}_{ib}^b$  abgezogen werden. Während gemäß dem Stand der Technik letztere mit einem Optimalfilter anhand einer Zustandserweiterung des obigen Differentialgleichungssystems sowie redundanten Messungen von zwei nominal horizontalen Beschleunigungsmessern des Strapdown-Kreisellkompass geschätzt werden, erfolgt die Verrechnung von Erd- und Transportrate als deterministische Korrektur mit Hilfe der Schiffsgeschwindigkeit  $u$  und der geographischen Breite  $\varphi$ , die üblicherweise von einem Log bzw. einem GPS-Empfänger stammen:

$$\underline{\omega}_{ie}^n + \underline{\omega}_{en}^n \triangleq \begin{pmatrix} \Omega_N \\ 0 \\ \Omega_D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_N \\ \rho_E \\ \rho_D \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \Omega \cdot \cos \varphi \\ 0 \\ -\Omega \cdot \sin \varphi \end{pmatrix} - \frac{u}{R} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \psi \\ \cos \psi \\ \sin \psi \cdot \tan \varphi \end{pmatrix}$$

Diese Gleichung wird nun folgendermaßen für ein horizontales Schiff erweitert:

$$\underline{\omega}_{ie}^n + \underline{\omega}_{en}^n + \underline{\underline{C}}_{nb} \cdot \delta \underline{\omega}_{ib}^b \approx \begin{pmatrix} \Omega \cdot \cos \varphi \\ 0 \\ -\Omega \cdot \sin \varphi \end{pmatrix} - \frac{u}{R} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \psi \\ \cos \psi \\ \sin \psi \cdot \tan \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_x \\ (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_y \\ (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_z \end{pmatrix}$$

Nach geeigneter Umstellung ergibt sich schließlich:

$$\underline{\omega}_{ie}^n + \underline{\omega}_{en}^n + \delta \underline{\omega}_{ib}^b \approx \begin{pmatrix} \Omega \cdot \cos \varphi \\ 0 \\ -\Omega \cdot \sin \varphi + (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_z \end{pmatrix} - \left( \frac{u}{R} - (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_y \right) \cdot \begin{pmatrix} -\sin \psi \\ \cos \psi \\ \sin \psi \cdot \tan \varphi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ 0 \end{pmatrix} \cdot (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_x$$

oder:

$$\underline{\omega}_{ie}^n + \underline{\omega}_{en}^n + \delta \underline{\omega}_{ib}^b \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & \sin \psi \\ 0 & 0 & -\cos \psi \\ 0 & 1 & -\sin \psi \cdot \frac{\tilde{\Omega}_D}{\Omega_N} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Omega_N \\ \tilde{\Omega}_D \\ \tilde{\Omega}_u \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ 0 \end{pmatrix} \cdot w_{d,d}$$

mit den anstelle der üblichen  $\delta \underline{\omega}_{ib}^b$  nun neuen Zustandserweiterungen  $\Omega_N = \Omega \cdot \cos \varphi$ ,  $\tilde{\Omega}_D \triangleq -\Omega \cdot \sin \varphi + (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_z$  und  $\tilde{\Omega}_u \triangleq \frac{u}{R} - (\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_y$ , die die Eigenschätzung der Fahrtfehlerkorrektur repräsentieren. Der Fehler des X-Drehratensensors  $(\delta \underline{\omega}_{ib}^b)_x$  wird als Rauschen  $w_{d,d}$  angenommen.

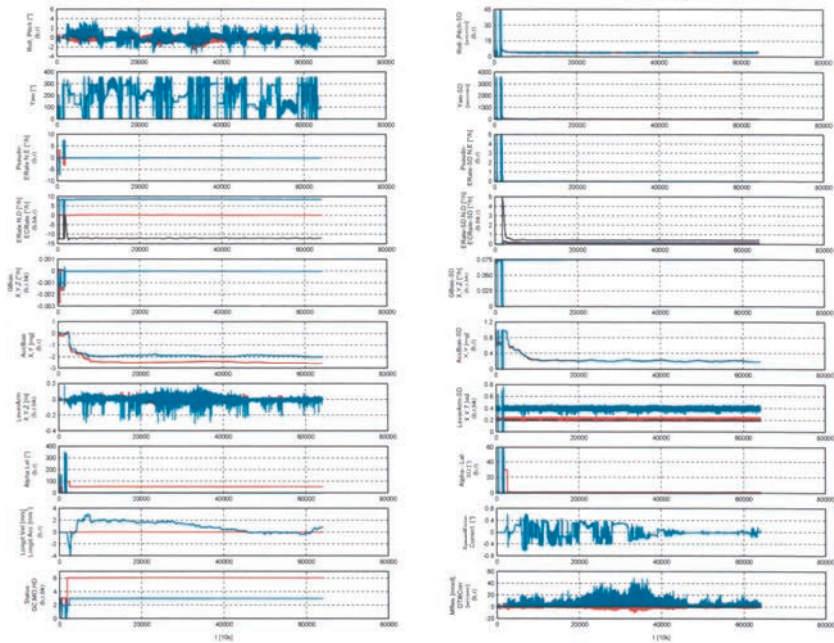


Abb. 3.5: Zustandsvektor des Strapdown-Kreisellkompass Standard 30 MF während einer Seerprobungswoche

Abbildung 3.5 zeigt den Zustandsvektor des Strapdown-Kreisellkompass Standard 30 MF während einer Erprobungswoche in der Nordsee. Subplot (Zeile 2, Spalte 1) stellt den Kurswinkelverlauf dar, während in Subplot (4, 1) die Schätzungen der Komponenten Nord (blau) und Vertikal (schwarz) der Erddrehrate sowie der bei kleiner Fahrt nahezu verschwindenden Transportrate (rot) zu sehen sind. Die Schätzungsgenauigkeit aller drei Größen liegt im Bereich von  $0,1^\circ/h$  (Subplot (4, 2)), so dass eine Kurswinkelgenauigkeit von besser als einem Grad vorliegt. Erwähnenswert ist noch der rote Graph in Subplot (10, 1), der nach dem Systemneustart und der Unterbrechung der Breiten- und Geschwindigkeitseingabe die Kompassbetriebsart „Coarse alignment without position available“ (2) sowie nach einer weiteren halben Stunde „Gyro compassing without position and without speed available“ (6) dokumentiert. Der Kompass ist nach gut zwei Stunden eingeschwenkt und einsetzbar mit dem Status 3 „Degraded gyro compassing“ (blauer Graph in Subplot (10, 1)). Die in Abbildung 3.6 berechnete Kurswindeldifferenz zwischen dem Strapdown-Kreisellkompass Standard 30 MF und dem mechatronischen Kreisellkompass Standard 22 ist betragsmäßig kleiner als einen halben Grad und bestätigt die obige innere Genauigkeitseinschätzung.

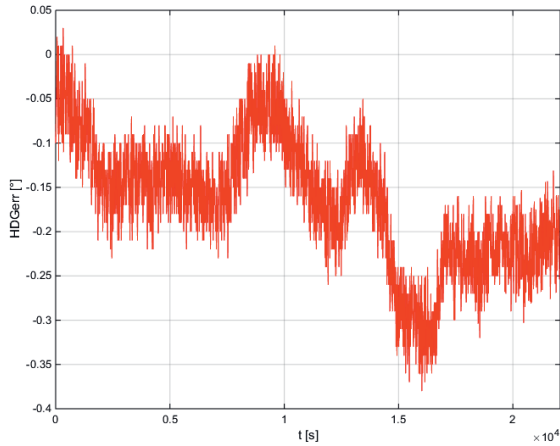


Abb. 3.6: Kurswinkeldifferenz zwischen dem Strapdown-Kreisellkompass Standard 30 MF und dem mechatronischen Kreisellkompass Standard 22 während eines sechsständigen Zeitfensters

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt PRS Gyro hat wichtige Ergebnisse zur Erhöhung der Betriebssicherheit der Hochseeschifffahrt erarbeitet:

1. Zur Überwindung der rechnerischen Unstetigkeit des Kurswinkels am Nord- und Südpol ist ein neues Signalverarbeitungsverfahren entworfen und anhand von Simulationen verifiziert worden.
2. Ein völlig autonomer Strapdown-Schiffskreisellkompass wurde realisiert, demonstriert und patentiert (/9/).
3. Ein Galileo PRS-fähiger GNSS-Empfänger konnte mit verhältnismäßig geringen Mitteln aufgebaut werden.
4. Anhand fortschrittlicher Signalverarbeitungsverfahren konnten Navigationsdaten aus dem E6A-Rohdatenstrom korrekt extrahiert werden.

## DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Projektträger Jülich für die Projektunterstützung und dem Bundesministerium für Wirtschaft für die Bereitstellung der Fördermittel.

## LITERATUR/VERÖFFENTLICHUNGEN/PATENTE

- /1/ Günther, C., A Survey of Spoofing and Counter-Measures, *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 61, No. 3, Fall 2014, pp. 159 – 177.
- /2/ Thomas, M., Norton, J., Jones, A., Hopper, A., Ward, N., Cannon, P., Ackroyd, N., Cruddace, P., and Unwin, M., *Global Navigation Space Systems: Reliance and Vulnerabilities*, The Royal Academy of Engineering, London, 2011.
- /3/ Shepard, D. P., Bhatti, J. A., Humphreys, T. E., *Drone Hack: Spoofing Attack Demonstration on a Civilian Unmanned Aerial Vehicle*, *GPS World*, Vol. 23, August 2012, pp. 30-33.
- /4/ IEC 61174, *Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Electronic chart display and information system (ECDIS) – Operational and performance requirements, methods of testing and required test results*, International Electrotechnical Commission, Edition 4.0, August 2015, ISBN 978-2-8322-2822-7.
- /5/ IEC 62065, *Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Track control systems – Operational and performance requirements, methods of testing and required test results*, International Electrotechnical Commission, Edition 2.0, February 2014, ISBN 978-2-8322-1381-0.
- /6/ Mangold, U., *Anwendungsorientierte Genauigkeitsanalysen von satellitengestützten Trägheitsnavigationssystemen*, Universität Stuttgart, Bericht aus dem Institut A für Mechanik 5/1998, ISSN 0946-7157.
- /7/ Britting, K. R., *Inertial Navigation Systems Analysis*, John Wiley & Sons, Inc. 1971, ISBN: 0-471-10485-X.
- /8/ Wendel, J., *Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2011, ISBN: 978-3-486-70439-6.
- /9/ United States Patent and Trademark Office, US 10,900,782 B2; Jan. 26, 2021: *Maintenancefree Strap-down Ship's Gyro Compass*, 26.01.2021.
- /10/ Borre, K., Akos, D. M., Bertelsen, N., Rinder, P., and Jensen, S. H., *A software defined GPS and Galileo receiver*, Birkhäuser, pp. 89 – 95.
- /11/ Rügamer, A., Neumaier, P., Sommer, P., Garzia, F., Rohmer, G., Konovaltsev, A., Sgammini, M., Caizzone, S., Meurer, M., Wendel, J., Schubert, F., Baumann, S., *BASE-II: A Robust and Experimental Galileo PRS Receiver Development Platform*, Proc. of the 27th International Technical Meeting of the ION Satellite Division, ION GNSS+ 2014, Tampa, Florida, U.S. A., September 8 – 12, 2014.
- /12/ Schubert, F. M., Wendel, J., Söllner, M., Kaindl, M., and Kohl, R., *The Astrium Correlator: Unambiguous Tracking of High-Rate BOC Signals*, 2014 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium – PLANS 2014, 2014, pp. 589 – 601.
- /13/ Kaplan, E. D., and Hegarty, Ch. J., *Understanding GPS: principles and applications*, 2nd edition, ARTECH HOUSE, Inc., pp. 170 – 172, pp. 179 – 183.



# DIGITALE KÜSTE –

ROADMAP UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZU INNOVATIONEN FÜR DEN  
MARITIMEN STANDORT DEUTSCHLAND

## AUTOREN

<b>MATTHIAS STEIDEL</b>	OFFIS INSTITUT FÜR INFORMATIK, OLDENBURG
<b>PROF. DR.-ING. AXEL HAHN</b>	OFFIS INSTITUT FÜR INFORMATIK, OLDENBURG
<b>ALEXANDER NIES</b>	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR KOMMUNIKATION, INFORMATIONSVERRARBEITUNG UND ERGONOMIE FKIE, WACHTBERG
<b>PD DR. ALEXANDER WEIß</b>	HELMUT SCHMIDT UNIVERSITÄT, HAMBURG
<b>PROF. DR. GARY SCHAAL</b>	HELMUT SCHMIDT UNIVERSITÄT, HAMBURG

## EINLEITUNG

Uns allen wird täglich bewusst, wie Digitalisierung viele Bereiche des Lebens und der Wirtschaft verändert. Es gilt diese unabwendbaren Veränderungen bewusst zu steuern und zu nutzen. Was bedeutet Digitalisierung für unsere Küsten und den Maritimen Transport? Wie kann unsere Vision für die Zukunft aussehen? Was sind die Produkte der Zukunft? Welche Handlungsempfehlungen lassen sich daraus für Wirtschaft und Politik ableiten?

In diesem Sinne zeigt das Vorhaben „Digitale Küste“ Handlungsempfehlungen zur nachhaltigen Digitalisierung der deutschen maritimen Wirtschaft auf. Die Handlungsempfehlungen ergeben sich aus einer methodisch angeleiteten Zukunftsbetrachtung der maritimen Wirtschaft. Ausgehend vom heutigen technologischen, wirtschaftlichen und (global-) politischen Zustand der maritimen Wirtschaft wurden mögliche Zukunftsszenarien, unter der Verwendung der Szenariotechnik (s. Abb. 1) [1]–[3], entwickelt. Aus einer parallelen visionären Betrachtung der Digitalisierung der maritimen Wirtschaft wurde die Leitvision „Sichere Digitale Küste 2030“ projiziert: eine idealisierte Vorstellung einer nachhaltig und sicheren digitalisierten maritimen Wirtschaft. Angereichert wurden diese Arbeitsschritte durch Interviews, Fragebögen und Workshops, bei denen Stakeholder aus Industrie, Politik und Forschung beteiligt waren. Die gemeinsame Betrachtung der Zukunftsszenarien und der Leitvision ergeben Handlungsempfehlungen für die Wirtschaft, Politik und Forschung zur proaktiven und erfolgreichen Gestaltung der Digitalisierung und Weiterentwicklung von Deutschlands maritimer Wirtschaft.

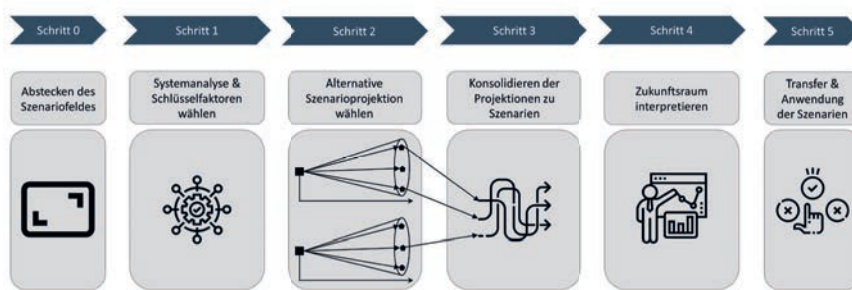


Abb. 1: Der Prozess der Szenariotechnik besteht aus vier Schritten und resultiert in Szenarien, aus denen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. (Angelehnt an [2])

## 2. DIGITALISIERUNG DER MARITIMEN INDUSTRIE BIS 2030 – DREI SZENARIEN

### 2.1. SZENARIO 1: WACHSTUM DURCH GANZHEITLICHE DIGITALISIERUNG

Die wirtschaftlichen Folgen der Corona-Pandemie bleiben aus und begünstigen Investitionen in digitale Technologien, wodurch die Digitalisierung für Wirtschaftswachstum in der Branche sorgt. Prozessumgestaltungen und innovative Technologien sorgen nicht nur für mehr Effizienz, sondern leisten auch einen essentiellen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz sowie Sicherheit. Grundlage sind technologische Innovationen aus den Bereichen echtzeitfähige Kommunikationstechnologien, Sensorik, Green Shipping und Plattformökonomien.

Wichtiges Element für diese positive Entwicklung ist die Berücksichtigung von Cybersicherheit. Digitale Innovationen entstehen unter dem Grundsatz „Security by Design“, regelmäßige Sicherheitsaudits decken dabei Schwachstellen auf und sorgen so für eine sichere Digitalisierung. Das Bewusstsein für Cybersicherheit ist auf allen Ebenen in der Branche verankert und bildet die Grundlage für entsprechende Anstrengungen.

Verlässliche politische Rahmenbedingungen ermöglichen eine erfolgreiche Digitalisierung. Die legislativen Gremien auf EU-, Bundes- und Landesebene sorgen für klare und einheitliche Regulierungen. Darüber hinaus hat die Politik ein Klima geschaffen, das die Digitalisierung und ihre Umsetzung im maritimen Umfeld positiv flankiert. Dies schließt entsprechende Forschungs- und Förderprogramme ein.

### 2.2. SZENARIO 2: DIGITALE INSELN IN EINER ANALOGEN WELT

Durch die Corona-Pandemie entwickelt sich eine weltwirtschaftliche Rezession, vergleichbar mit der Finanzkrise 2008. Notwendige Investitionen in Technologien und Innovationen finden nur unzureichend statt. Auf Grund fehlender Standards und Interoperabilität entstehen digitale Insellösungen, die die analogen Prozesse nicht vollständig digitalisieren. Fehlende technologische und digitale Innovationen haben allerdings nicht nur eine negative Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Branche. Das Potential zur Reduktion von Emissionen durch Prozessrestrukturierung und -optimierung durch Digitalisierung wird verschenkt.



Digitale Inseln dominieren die Systemlandschaft der maritimen Wirtschaft, was mit einer Vernachlässigung der Cybersicherheit einhergeht: die Unternehmen sind sich zwar der wachsenden Gefahr, Zielscheibe von Cyberkriminalität zu werden, bewusst, allerdings wird die Gefahr aus Kostengründen wissentlich heruntergespielt. Auf Grund eines fehlenden ganzheitlichen Digitalisierungskonzepts mit standardisierten Schnittstellen und sicheren Kommunikationstechnologien der weitestgehend heterogenen Insellösungen ist der Einsatz existierender Technologien schwer umsetzbar und teuer.

Die Politik verabschiedet finanziellen Hilfen und Konjunkturpakete, für die Geld aus den Innovations- und Förderprogrammen gezogen wird. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den großen Unternehmen werden heruntergefahren, was eine Innovationsflaute in Deutschland nach sich zieht. EU-weit ist keine maritime Gesamtstrategie zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und zur Innovationsförderung vorhanden. Die EU konzentriert sich hauptsächlich auf die Bewältigung der wirtschaftlichen Krise und fördert lediglich verschiedene Einzelprojekte, die als Leuchtturmprojekte ausgewiesen werden. Auf Grund einer fehlenden maritimen europäischen Gesamtstrategie verpuffen die gewünschten Effekte durch die Förderung einzelner großer Forschungsvorhaben.

### **2.3. SZENARIO 3: DIGITALE AMBIVALENZ UND (GEO)POLITISCHER STILLSTAND**

Seit 2008 war Europa krisengeschüttelt: Finanz- und Wirtschaftskrise, Eurokrise, Flucht- und Migrationskrise, Brexit und die Pandemie – die EU ist im Ansehen der Bevölkerung jeweils geschwächt aus diesen Krisen hervorgegangen. Infolgedessen haben sich in den meisten Staaten der EU nationale Kräfte verstärkt durchgesetzt, die die eigene Wirtschaft stärken wollen aber nicht mehr an europäischer oder globaler Kooperation interessiert sind. Auf globaler Ebene bildet sich eine multipolare Ordnung heraus, in der starke Staaten wie die USA, China oder Russland ihre Interessen verfolgen und dabei kaum noch die Idee global verbindlicher Normen und Regulierungen und Kooperation verfolgen.

Als Folge davon werden Digitalisierung und Wirtschaft zwar in nationalen Leuchtturmprojekten unterstützt und gefördert, aber die fehlende internationale Einbettung führt zur Schwächung vieler exportorientierter Branchen. Digitalisierung wird zwar in Insellösungen vorangetrieben, aber durch ungleichen Ausbau und weitgehend fehlende Regulierung treten neben wachstumsfördernden Effekten auch negative Folgen der Digitalisierung auf. Dies betrifft zum einen die Felder des Datenschutzes und der staatlichen Überwachung, aber auch ökonomische, ökologische und soziale Negativeffekte von Digitalisierung. Insgesamt wird Digitalisierung also verstärkt ausgebaut, aber sie führt zu gemischten, teilweise stark dysfunktionalen Effekten, die einerseits gesamtgesellschaftlich und andererseits besonders im Bereich der Wirtschaft auftreten.

Die ungleiche Digitalisierung ist von ausbleibender Vernetzung und Standardisierung gekennzeichnet und führt auch zu einer Sicherheitslandschaft, die auf lokale Expertise, Ressourcen und Motivation angewiesen ist. Volkswirtschaftlich werden in dieser Situation

bestimmte Kostenreduktionseffekte nicht erzielt, so dass Sicherheitsausbau insgesamt teurer wird, als er in einer kooperativen Umgebung sein könnte. Dies führt zu einer sehr ungleichen Sicherheitslandschaft: Zentren hoher Sicherheit sind umgeben von wenig resilienten Peripherien.

### **3. VISION SICHERE DIGITALE KÜSTE 2030**

Die Vision Sichere Digitale Küste 230 wurde mit Hilfe der drei Szenarien, den Interviews und Fragebögenantworten der Stakeholder entwickelt. Grundsätzlich beschreibt die Vision Sichere Digitale Küste 2030 einen realistisch anzustrebenden, aber auch idealisierten Zustand der maritimen Wirtschaft im Jahr 2030. In ihrer Gesamtheit gibt die Vision die Stoßrichtungen für die Digitalisierung für die Wirtschaft, Politik und Forschung vor.

#### **Digitalisierung für den effizienten Seeverkehr und erfolgreichen Meeres- und Umweltschutz**

Insbesondere Technologien, durch die Prozesse umstrukturiert und optimiert werden, haben unmittelbar nach einer Markteinführung einen positiven Effekt auf die Emissionsbilanz. Die Einführung von standardisierten, echtzeitfähigen und interoperabilitätsfähigen Plattformökonomien hat die Transformation einer emissionsbezogenen Optimierung der gesamten maritimen Verkehrs- und Logistiksteuerung auf Land und See ermöglicht. Durch intelligente und kooperative Verkehrsleitsysteme können die Schiffsankünfte präzise und treibstoffoptimiert geplant werden.

Echtzeitfähige Plattformtechnologien darüber hinaus auch als wirkungsvolles Werkzeug für den Meeresschutz etabliert. Intelligente, auf künstlicher Intelligenz basierende Algorithmen, können illegales Fischen und die illegale Müllentsorgung auf See zuverlässig erkennen.

Der küstennahe Verkehr in Deutschland wird nach erfolgreicher Erprobungsphase mit modernen Schiffen emissionsfrei und hochautomatisiert abgewickelt, was das Ergebnis der Förderung von Innovationen im Bereich alternativer Antriebe ist. Diese hochtechnisierten Schiffe werden von deutschen Werften gebaut, die durch Förderprogramme des BMWis in den Bereichen Schiffbau und Meerestechnik unterstützt werden.

#### **Schifffahrt 4.0 denkt Autonomie weiter**

Schifffahrt 4.0 zeichnet sich durch volldigitalisierte Schiffe und Schifffahrtswege aus. Der Full Digital Twin ermöglicht eine Betriebsüberwachung an Bord und Land in Echtzeit. Die Daten, die während der Fahrt durch echtzeitfähige Sensoren in den Schiffen gesammelt werden, sind hochdimensional, kostbar und werden gewinnbringend durch die Nutzung von Big Data Technologien eingesetzt. Anwendungsfelder sind: Predictive Maintenance, Fleet Monitoring, Fleet Management und Seeraumüberwachung in Echtzeit.

Die Digitalisierung des Seeraumes und echtzeitfähige Management-, Leit- und Sicherungstechnologie sind landseitig die notwendige Voraussetzung. Digitalisierte Schifffahrt der

Zukunft bedeutet wie bei allen anderen Verkehrsträgern auch eine enge Vernetzung der Fahrzeuge mit der Infrastruktur. Hier entstehen komplexe Produkte die hohes Systemverständnis voraussetzen und erhebliches wirtschaftliches Potential bieten.

Schifffahrt 4.0 beinhaltet eine innovative Seeraumüberwachung in Echtzeit, unabhängig für Sicherheit und Effizienz in der deutschen Nord und Ostsee. Intelligente Algorithmen erkennen automatisch gefährliche Schiffsbegegnungssituationen auf See und unterstützen kooperativ bei der Auflösung dieser Situationen. Möglich gemacht wird diese Art der Seeraumüberwachung durch echtzeitfähige Kommunikationstechnologien und moderne Verkehrsüberwachungszentren.

Die Entwicklung und der Betrieb hochautomatisierter Schiffe in der deutschen Nord- und Ostsee ist ein wesentliches Produkt von industrienaher Forschung und Entwicklung, ermöglicht durch die Förderprogramme des BMWi und anderer Ressorts. Durch Innovationen in Forschung und Entwicklung haben deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen hochautomatisierte Schiffe autark gemacht. Durch die Förderprogramme haben sich Deutsche Werften und Zulieferfirmen technologisch hochspezialisiert verantworten einen Hightech-Schiffbau made in Germany.

#### **Moderne und sichere Plattformökonomien zur Prozessoptimierung**

Moderne und sichere Plattformtechnologien ermöglichen den sicheren Austausch von Informationen zur effizienten Prozessgestaltung durch Netzwerkeffekte. Plattformen sammeln Echtzeitinformationen über die Schiffe, wie Ankunftszeiten und Ladungsdetails und stellen sie allen beteiligten Stakeholdern zur Verfügung.

Die Möglichkeiten der Seeraumüberwachung und innovative maritime Verkehrsleitsysteme haben sich durch die Nutzung solcher Plattformtechnologien um ein Vielfaches potenziert. Es ist ein kooperativ agierendes Leitsystem für die deutsche Nord- und Ostsee entstanden, welches den Verkehr in Abhängigkeit der Verkehrslage sicher und effizient leitet. Potentielle Gefahrenlagen auf See können in nahezu Echtzeit identifiziert werden und erlauben es, schnellstmöglich entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Die in der maritimen Wirtschaft entstandene Plattformökonomie funktioniert nur, weil technologischen Standards Interoperabilität zwischen den Systemen ermöglichen. In dieser Plattformökonomie entstehen Daten, die gewinnbringend zur Prozessoptimierung eingesetzt werden. Als Grundlage hierfür existiert ein ausbalanciertes Verhältnis zwischen Datenschutz, Sicherheit und Nutzung, was entsprechend staatlich reguliert ist.

#### **Big Data und die Auflösung des Zielkonflikts zwischen Datenschutz und Datennutzung**

Big Data ermöglicht den Ausbau von Echtzeittechnologien und die Vernetzung von Prozessen und Verfahren für Effizienzsteigerungen, wobei insbesondere der Zielkonflikt zwischen Datenschutz und -nutzung aufgelöst wird, um Blockaden zu überwinden. Das Bedürfnis nach Schutz individueller Daten, dessen Erfüllung gerade in Deutschland eine Bedingung

gesellschaftlicher Akzeptanz ist, wird so bedient, dass zugleich die industrielle Nutzung der Daten möglich bleibt. Dies wird durch Maßnahmen zur Steigerung der Datensicherheit und klare Regulierungen zum Dateneigentum ermöglicht.

### **Cybersicherheit und Digitalisierung gehen Hand in Hand**

Erfolgreiche Digitalisierung setzt ebenso erfolgreiche Cybersicherheit voraus. Cybersicherheit ist in Deutschland ein integrierter Prozessschritt auf dem Weg zur Digitalisierung.

Kritische Systeme und Infrastrukturen an Bord, im Hafen und in den Kommunikationsnetzen sind gegen existenzbedrohende Risiken geschützt. Grundlage sind regelmäßige systematische Bedrohungsanalysen, die Schwachstellen offengelegen. Es sind Mechanismen installiert („Intrusion Detection Systems“), die eine rasche Entdeckung der Angriffe sicherstellen und dadurch deren Auswirkungen minimalisieren.

Es herrscht bei allen Akteuren der Branche ein starkes Bewusstsein für die Notwendigkeiten der Cybersicherheit. Infolgedessen ist die Triade der Cybersicherheit, bestehend aus Prävention, Detektion und Reaktion, in alle relevanten Fertigungsschritte implementiert. Elementare Prinzipien der Cybersicherheit wie Security by Design, Security by Default und Defense in depth sind als fester Bestandteil in Entwicklungsprozesse integriert.

### **Politik fördert Innovationsstandort Deutschland**

Die Forschung und Entwicklung von technologischen Innovationen zur Digitalisierung werden in Deutschland gezielt durch die Politik gefördert. Insbesondere die Förderung von risikoreichen Vorhaben hat sich als Innovationsinkubator erwiesen. Insbesondere für risikoreiche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben hat sich die Einrichtung eines Venture Capital Fonds rentiert. Staatliche Vertreter in Standardisierungsgremien und Schifffahrtsorganisationen vertreten entstandene Innovationen zur Einbindung in Standards und Regelungen.

Ziel politischer Förderung ist dabei in der Gesamtschau, alle drei Bereiche des 'Nachhaltigkeitsdreiecks' gleichermaßen zu fördern: ökologisch, ökonomisch und sozial. In der politischen Förderung geht es darum, Zielkonflikte zwischen diesen drei Bereichen zu minimieren.

## **4. HANDLUNGSEMPFEHLUNG UM EINE SICHERE DIGITALE KÜSTE ZU ERSCHAFFEN**

Mit der Vision Sichere Digitale Küste 2030 existieren Leitlinien, die die Stoßrichtung der maritimen Wirtschaft im Kontext der Digitalisierung vorgeben. Im Vergleich dazu beschreiben die drei Szenarien mögliche Zukunftsentwicklungen der maritimen Wirtschaft in Deutschland. Für die Politik und Wirtschaft stellt sich die Frage, wie der idealisierte Zustand der maritimen Wirtschaft aus der Vision erreicht werden kann. Gleichzeitig ist offen, wie die negativen Entwicklungsmöglichkeiten der maritimen Wirtschaft proaktiv vermieden werden können bei gleichzeitiger Umsetzung der positiven Aspekte aus den jeweiligen Szenarien.

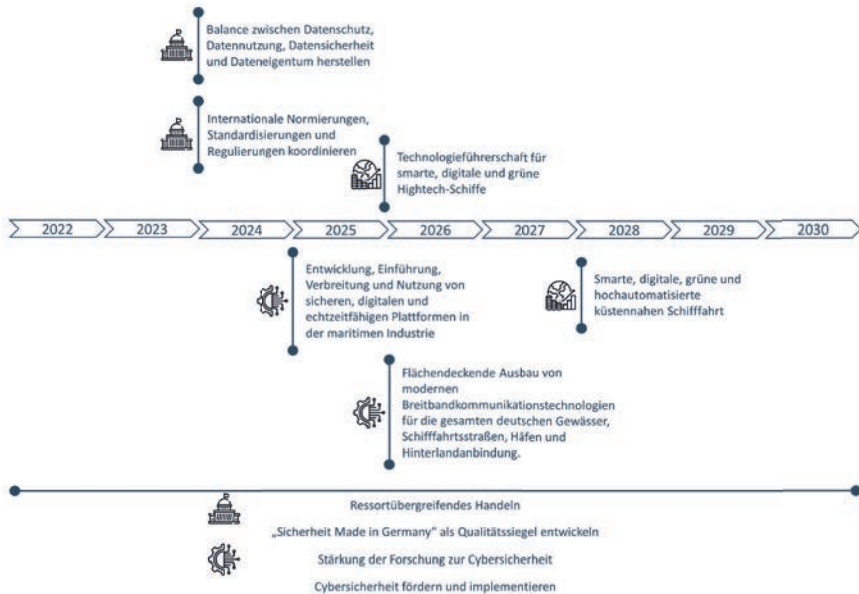


Abb. 2: Die zeitliche Abfolge der Handlungsempfehlungen um eine sichere digitale Küste zu erschaffen.

Die im Folgenden formulierten Handlungsempfehlungen setzen hier an und sollen der Politik, Wirtschaft und Forschung als Leitlinie für zukünftige Aktivitäten dienen um die erstrebenswerten Aspekte der Vision und Szenarien zu erreichen. Dabei adressieren die Empfehlungen die Felder Politik, Wirtschaft, Technologie und Sicherheit.

- › Ausgewogene Balance zwischen Datenschutz, Datennutzung, Datensicherheit und Dateneigentum herstellen
- › Gestaltung ergebnisoffener und innovationsfördernder Forschungs- und Entwicklungsförderprogramme für digitale Innovationen
- › Ressortübergreifendes Handeln
- › Internationale Normierungen, Standardisierungen und Regulierungen
- › Der Schiffbau muss die Technologieführerschaft für smarte, digitale und grüne Hightech-Schiffe beanspruchen.
- › Deutschland wird Vorreiter in einer smarten, digitalen, grünen und hochautomatisierten küstennahen Schifffahrt
- › Flächendeckender Ausbau von modernen Breitbandkommunikationstechnologien für die Entwicklung, Einführung, Verbreitung und Nutzung von digitalen Plattformen in der maritimen Industrie muss proaktiv vorangetrieben werden.

- › „Sicherheit: Made in Germany“ als Qualitätssiegel entwickeln
- › Stärkung der Forschung zur Cybersicherheit
- › Cybersicherheit fördern und implementieren

Insbesondere für die Handlungsempfehlungen aus den Feldern der Wirtschaft, Technologie und Sicherheit ergeben sich Leuchtturmprojekte, die jeweils wegweisende Vorhaben sind und konkrete Umsetzungsmöglichkeiten der Handlungsempfehlungen darstellen. Für die Formulierung der Leuchtturmprojekte wurden die Ergebnisse der Stakeholderbefragungen ausgewertet, um so möglichst zielgenau die Bedarfe aus der Wirtschaft, Politik und Forschung zu adressieren.

Die vollständigen Projektergebnisse sind in der „Roadmap Sichere Digitale Küste 2030 – Eine Zukunftsvision für die maritime Wirtschaft“ zu finden. Dort sind ausführliche Beschreibungen der Szenarien, Vision und der Handlungsempfehlungen samt der dazugehörigen Leuchtturmprojekte zu finden.

Für eine Version der Roadmap „Roadmap Sichere Digitale Küste 2030 – Eine Zukunftsvision für die maritime Wirtschaft“ wenden Sie sich an:

Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn      axel.hahn@offis.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Digitalisierung bietet die Chance die Systemleistung der deutschen Küsten für den maritimen Transport signifikant zu verbessern und neue Produkte sowie neue Geschäftsmodelle weltweit anzubieten bzw. zu etablieren. In diesem Vorhaben wurden systematisch und methodisch unter breiter Beteiligung der Stakeholder mögliche Zukunftsentwicklungen für die Digitalisierung der deutschen Küsten und der damit direkt verbundenen maritimen Wirtschaft abgeleitet. Drei Szenarien bilden den Kontext für eine Vision Digitale Küste 2030. Für deren Umsetzung hier Handlungsempfehlungen und Leitvorhaben aufgezeigt wurden. Diese Handlungsempfehlungen haben das Potential die Wirtschaftsleistung zu verbessern, neue Produkte und Dienstleistung zu generieren und dazu beitragen unsere Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

## DANKSAGUNG

Das Konsortium bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung und beim Projektträger Jülich für die gute administrative Unterstützung. Des Weiteren bedankt sich das Konsortium bei allen Stakeholdern aus Industrie, Politik und Forschung, die als Interviewpartner\*innen, Workshopeteilnehmer\*innen und Teilnehmer\*innen den Fragebögen Input für das Vorhaben geliefert haben.

## LITERATUR

- [1] J. Gausemeier und C. Plass, Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen, 2., Überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2014.
- [2] A. Fink und A. Siebe, Szenario-Management: von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen. Frankfurt New York: Campus Verlag, 2016.
- [3] F. E. P. Wilms und F. E. Wilms, Hrsg., Szenariotechnik: vom Umgang mit der Zukunft, 1. Aufl. Bern Stuttgart Wien: Haupt, 2006.
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hrsg., „Maritime Forschungsstrategie 2025“. Apr. 2018.
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Innovativer Schiffbau sichert wettbewerbsfähige Arbeitsplätze“. 2019.





# ISYSTEM4EFUELS –

INTELLIGENTES SYSTEM FÜR DEN EINSATZ STROMBASIERTER KRAFTSTOFFE

## AUTOREN

<b>EMANUEL RAUER</b>	WOODWARD L'ORANGE GMBH, STUTTGART
<b>MATTHIAS WIELAND</b>	AVL SOFTWARE AND FUNCTIONS GMBH, REGENSBURG
<b>ANDREAS SCHMIDT</b>	SENSOR-TECHNIK WIEDEMANN GMBH, KAUFBEUREN
<b>BENJAMIN STENGEL</b>	UNIVERSITÄT ROSTOCK, ROSTOCK
<b>DR.-ING. FABIAN PINKERT</b>	FVTR GMBH, ROSTOCK
<b>ERWIN SWIDERSKI</b>	FVTR GMBH, ROSTOCK
<b>BOYU YANG</b>	AVL DEUTSCHLAND GMBH, MÜNCHEN

## EINLEITUNG

Der Einsatz strombasierter CO<sub>2</sub>-neutraler Kraftstoffe wird zukünftig im maritimen Sektor ein wichtiger Faktor sein, die strengeren CO<sub>2</sub>-Ziele zu erreichen und der globalen Klimaerwärmung, bei gleichbleibender Nutzung der maritimen Infrastruktur, entgegenzuwirken. Gleichzeitig stellen die unsichere Verfügbarkeit von E-Fuels und die hafengebundenen Kraftstoffqualitäten große Herausforderungen für die wirkungsgradoptimierte Auslegung dieser Motoren dar.

Mit der neuen NFC-Technologie (Needle Force Control) ist es durch die Onlineerkennung von Einspritzbeginn und -ende möglich, alternative Kraftstoffe durch ihre Unterschiede im Einspritzverhalten zu erkennen. In Kombination mit der Verbrennungsdrucküberwachung werden diese Informationen validiert bzw. ergänzt, so dass völlig neue Kraftstoffregelstrategien ermöglicht werden. Diese sind vor allem im Hinblick auf uneinheitliche und sich ändernde Emissionsvorschriften von wachsender Bedeutung. Neben der Erkennung alternativer Kraftstoffe eignet sich die NFC-Technologie auch zur Überwachung des Einspritzverhaltens der Injektoren über die gesamte Nutzungsdauer und kann so in eine übergreifende systemische Zustandsüberwachung integriert werden und Verschleiß- und Drifteffekte durch eine angepasste Regelung kompensieren.

In einem Gesamtmotormodell wurde dieses Health-Monitoring-System betrachtet. Die Gesamtsystemmodellierung ermöglicht dabei eine Echtzeitvorhersage des Systemverhaltens im realen Einsatz. Das Motormodell besteht aus dem Injektormodell, dem Motormodell sowie allen nötigen Sensor- und Funktionsmodellen.

Zwei E-Fuels, OME und HVO, wurden mit Dieselmotorkraftstoff gemischt, um die gesamte Prozesskette in einem Schiffsdieselmotor zu analysieren. Die Veränderungen der Einspritzhydraulik

wurden mit einem Einspritzratenanalysator gemessen. Die Einflüsse auf das Einspritz- und Verbrennungsverhalten unter motorähnlichen Bedingungen wurden mit einer Hochtemperatur-Hochdruck-Einspritzkammer gemessen. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in der Flammenstruktur von Dieselkraftstoff und OME und erlauben Erklärungen für das veränderte Emissionsverhalten am Motor. Um die thermodynamischen Effekte und den Einfluss auf die Schadstoffbildung zu untersuchen, wurden Motorversuche mit den gleichen E-Fuel-Mischungen an einem Einzylinderaggregat durchgeführt.

## 2. BEURTEILUNG DES EINSPRITZVERHALTENS VON E-FUELS

### 2.1. MESSTECHNIK

Für die Überwachung der Motorfunktion in der Entwicklung und während des Betriebes haben sich verschiedene messtechnische Ansätze etabliert. Im Vergleich zur Überwachung der Abgastemperatur bietet die Zylinderdrucküberwachung ein sehr detailliertes Bild der Verbrennung. Hierbei ist es möglich die thermodynamische Analyse des Drucksignals zu nutzen, um Erkenntnisse, wie Zündverzug, Entflammungsdauer oder Brennverlauf zu gewinnen. Für eine Vielzahl von Großmotoren zählt die Zylinderdruckindizierung zur Standardausstattung. [1]

Darüber hinaus erscheint es erstrebenswert über eine Messung Informationen zur Einspritzung direkt aus dem Nahbereich der Düse zu gewinnen. Alle Verfahren, die oberhalb der Düse messen, müssen das Übertragungsverhalten hydraulischer, mechanischer oder elektromechanischer Komponenten herauskorrigieren, was in der Regel nie vollständig gelingt. Die Messung des Steuerraumdrucks oberhalb der Düsennadel erweist sich als vielversprechend, da die Signalinformationen über das Injektoreinspritzverhalten fast ungefiltert vorliegen.

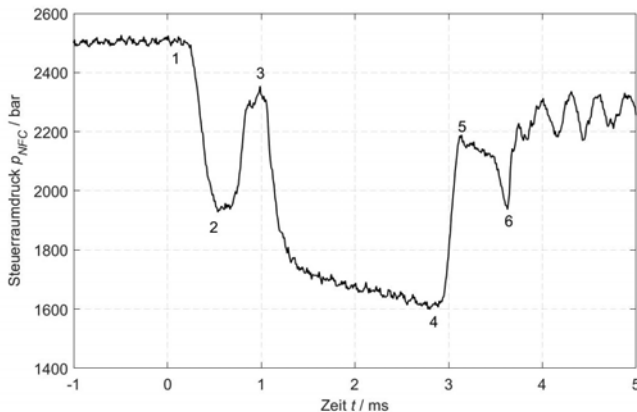


Abb. 1: Steuerraumdruck-/NFC-Signal

In Abbildung 1 ist ein charakteristischer Verlauf des im Steuerraum oberhalb der Düsennadel gemessenen Drucksignals dargestellt. Im NFC-Signal ist zu erkennen, dass infolge der

Bestromung des Elektromagneten sich das Pilotventil öffnet (1). Dadurch fällt der Druck im Steuerraum ab, ohne dass die Bewegung der Düsenadel beginnt. Sobald die durch den Druck erzeugte Kraft größer ist, als jene, die die Nadel in den Dichtsitz presst, startet die Nadelbewegung und die Einspritzung beginnt (2). Der Druckverlauf in dieser Phase ergibt sich aus Zu- und Abfluss in den Steuerraum und der Nadelöffnungsgeschwindigkeit. Die Nadelbewegung endet im Punkt (3). Der Druck im Steuerraum sinkt dann auf den durch das Verhältnis zwischen Zulauf und Ablauf gegebenen Druck ab. Aufgrund des Endes der Injektorbestromung schließt das Pilotventil (4) und der Druck im Steuerraum steigt schnell an. Ab Punkt 5 bewegt sich die Nadel in Richtung Sitz. Die Einspritzung endet, wenn die Nadel ihren Sitz erreicht hat (6). Dann steigt der Steuerraumdruck wieder stark an.

Besonders geeignet ist dieses Signal, weil die Druckamplitude auch bei sehr kleinen Einspritzmengen nahezu dem halben Systemdruck entspricht und damit gute Signal-Rausch-Verhältnisse vorliegen. Über einen Algorithmus, bei dem das Eingangssignal mehrfach gefiltert und abgeleitet wird, werden die beiden charakteristischen Punkte, Spritzbeginn und -ende identifiziert und deren Lage relativ zum Bestromungsbeginn ermittelt.

Somit steht mit der Kopplung aus Zylinderdruckindizierung und der neuartigen Injektorüberwachung eine Sensorik zur Verfügung, die genutzt wurde, um den Betrieb mit unterschiedlichen E-Fuels zu untersuchen. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit über diese Art von Überwachung den Verschleiß des Injektors zu detektieren und einer damit hergehenden Veränderung der Einspritzung entgegenzuwirken, um ein möglichst neutrales Verbrennungsverhalten zu gewährleisten.

## 2.2. ELEKTRONIKHARDWARE UND SOFTWARE

Bei den hier auftretenden Signalamplituden des Injektordrucksignals im mV-Bereich, werden möglichst kurze Verbindungen zwischen Signalquelle und -senke also dem Signalverstärker angestrebt. Wegen der hohen Temperaturen von ca. 150 °C an der Messzelle und des geringen zur Verfügung stehenden Raumes, ist eine Verstärkung in der Nähe der Signalquelle nicht möglich. Eine geschirmte Leitung führt von der Messzelle bis zur entwickelten Elektronikhardware, die die Verstärkung und Auswertung dieses Signals, sowie die Bestimmung von Bestromungsbeginn und -ende durchführt. Ein Datenspeicher hält zusätzlich injektorindividuelle Daten bereit und erfasst im Betrieb weitere. Diese Informationen können zur ECU kommuniziert werden. Auch im Servicefall kann auf die injektorbezogenen Daten zugegriffen werden.

Abbildung 2 zeigt die Leiterkarte mit Signalverstärker, Mikrocontroller mit Peripherie, Filterung und Spannungsversorgung. Links befindet sich der Lötanschluss zum Motorsteuergerät und rechts der Steckverbinder für die Zuleitung zur Messzelle.

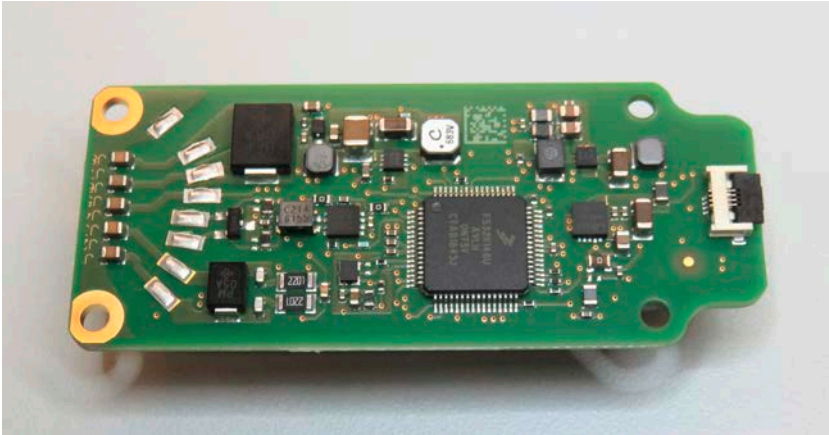


Abb. 2: Elektronische Baugruppe

Die Versorgungsspannung der Messzelle wird durch die Elektronikhardware bereitgestellt und einfach gefiltert. Eine sich auf die Signalqualität negativ auswirkende Schwankung der Spannung durch externe Störungen aus der Umwelt wird so bereits reduziert. Alle Verbindungen von der Messzelle in der Verstärkereinheit werden zusätzlich mit Ferriten geschützt, um ungewollte hochfrequente Einströmungen in die Versorgung und damit auch in die Signalverstärkung zu verhindern. Eine weitere Filterung von Gleichtakt- und differentiellen Störsignalen ist dem Eingang der Verstärkung vorgeschaltet. Das Nutzsignal wird von der Messzelle bis zum ersten Verstärkereingang differentiell geführt.

Die Abbildung 3 verdeutlicht die Empfindlichkeit des Aufbaus für Störungen von außen. Zwei Kurvenverläufe des verstärkten analogen Signals der Messzelle werden gegenübergestellt. Die linke Kurve zeigt den Signalverlauf ohne Abschirmung und die rechte den zeitlichen Verlauf mit Abschirmung bis wenige Millimeter vor der Lötverbindung. Das Nutzsignal wird durch die Qualität der Abschirmung in unmittelbarer Nähe des Lötanschlusses auf der Leiterkarte deutlich sichtbar beeinflusst. Die Störung wurde durch das Bestromungssignal verursacht, das ebenfalls in der Nähe des geringen Pegels des Nutzsignals geführt wird.

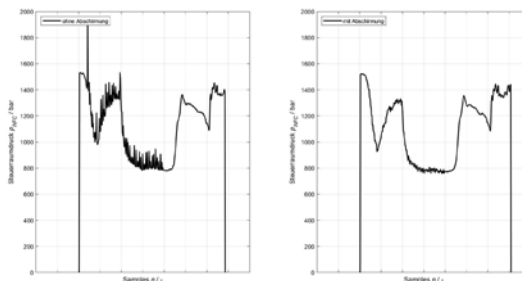


Abb. 3: Auswirkung unterschiedlich ausgeführter Abschirmungen des Bestromungssignals auf die Qualität des verstärkten Drucksignals

Die Verstärkung des Drucksignals wird mit einem Verstärker-IC durchgeführt, das über eine digitale Steuerung eingestellt werden kann. Ein Mikrocontroller, dessen integrierter AD-Wandler das verstärkte Ausgangssignal verarbeitet, übernimmt auch die Einstellung des Verstärkungsfaktors. Je nach zukünftiger Kombination der Komponenten, wie z. B. der Auswahl eines speziellen Injektors, einer andersempfindlichen Messzelle, kann in der unveränderten Schaltung ein anderer Verstärkungsfaktor für das analoge Signal eingestellt werden. Die dazu notwendigen Daten können dem Mikrocontroller über den CAN-Bus zugeführt werden. Injektorindividuelle Daten können in dem am Mikrocontroller angeschlossen Speicher abgelegt werden. Zusätzlich zu der bisher üblichen Verkabelung der Injektorbestromung wurden noch Leitungen für die Versorgung der Elektronikhardware und die CAN-Kommunikation eingeführt.

Um die Auswerteschaltung zu schützen, wird das pulswidenmodulierte Signal ( $U_{PVM}$ ) der Auswertung galvanisch getrennt zugeführt. Unabhängig vom verwendeten Motorsteuergerät und Injektortyp können Eingangsspannungen im Bereich von 35 V bis 125 V ohne Veränderung der Schaltung angelegt werden. Über ein Widerstandsnetzwerk wird das differentielle Signal einem Komparator zugeführt. Der gewonnene digitale Signalverlauf wird anschließend mit einem Schmitt-Trigger geformt und kann durch einen Mikrocontroller verarbeitet werden. Abbildung 4 zeigt oben den Spannungsverlauf des Bestromungssignals einer typischen ECU mit angeschlossenem Injektor. Der untere Kurvenverlauf zeigt das gewonnene Signal nach dem Schmitt-Trigger.

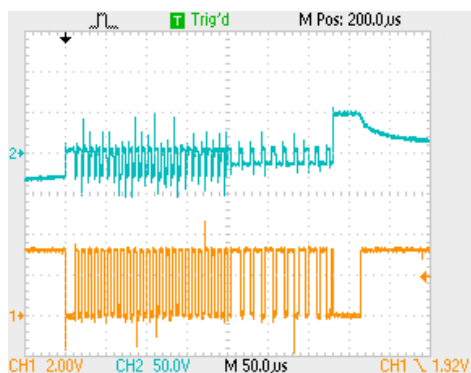


Abb. 4: Gewinnung eines für die digitale Schaltung verwertbaren Signals aus der Bestromung (UPWM) des Injektors

Die Hardware und die dazu entwickelte Software weist eine einfache Integrationsfähigkeit via „plug and play“ sowie eine Upgrade-Fähigkeit auf. Bei der Softwareentwicklung lag der Fokus auf den Eingangs- und Ausgangssignalen und den in den Funktionsblöcken zu verarbeitenden Signalen, um das Ziel eines autarken, d.h. wechselbaren Injektors für Motoren anzustreben.

Abbildung 5 zeigt die finale Softwarearchitektur. Die Funktionsgruppen wurden eingeteilt in Sensorsignalbearbeitung, Diagnose, Fehlermanagement, Schnittstellen und Daten-

speicherung. Zudem sind alle Funktionsblöcke mit deren zugehörigen Eingangs- und Ausgangssignalen dargestellt.

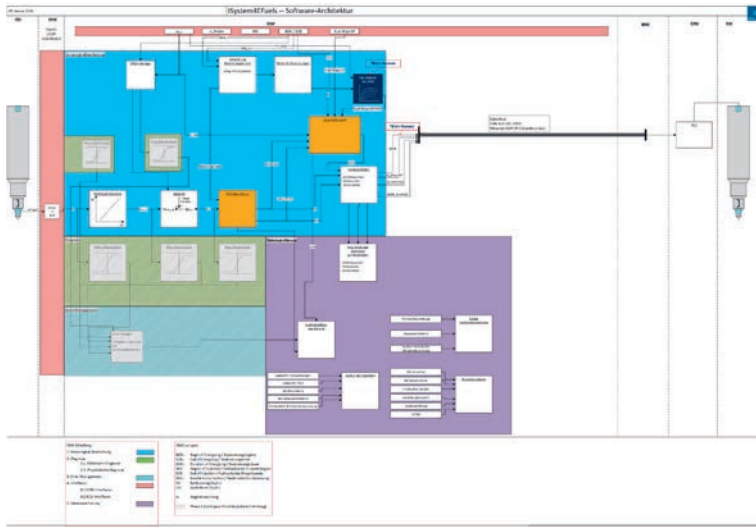


Abb. 5: Softwarearchitektur der Applikationssoftware zur Verschleißerkennung und Ansteuerkorrektur des Injektors

Farblich hervorgehoben sind in dieser Abbildung die Funktionsblöcke „NFC-Algorithmus“ und „Verschleißmodell“, welche in der laufenden Entwicklung in die Applikationssoftware eingebunden wurden. Der oben erwähnte Datenspeicher für individuelle Daten des Injektors ist ebenfalls Bestandteil der Software. Zudem besteht auch die Möglichkeit, Signale aus dem NFC-Algorithmus und dem Verschleißmodell abzulegen und damit verbrennungsrelevante Kenngrößen, verursacht durch unterschiedliche Kraftstoffe oder Injektorverschleiß, zu korrigieren.

Das gesamte System wird als Injection Control Unit (ICU) bezeichnet und dient als finale Steuereinheit. In Abbildung 6 ist eine schematische Darstellung dieser Elektronikhardware zusammen mit den darin enthaltenen Softwareblöcken abgebildet.



Abb. 6: Injection Control Unit (ICU) als Hardwareübersicht

Die Funktionserstellung auf Basis, der definierten Anforderungen erfolgte in Matlab Simulink. Alle Funktionen wurden daraufhin an einem HiL-System getestet, grundappliziert und

optimiert. In der Simulationsumgebung wurden auch die Schnittstellen zur Elektronikhardware geprüft und diese durch diverse Anpassungen der oben genannten Elektronikhardwaresignale weiterentwickelt.

Die Integration der finalen Softwareversion in die Elektronikhardware wurde in zwei Phasen eingeteilt. In Phase 1 wurde die Applikationssoftware auf einer bestehenden ECU (Large-Engine-Control-Module (LECM)), lauffähig gemacht, um diese am Motorprüfstand in Betrieb zu nehmen. In dieser Phase fand somit die erste Zusammenführung von Motor und Injektorintelligenz statt. In der zweiten Phase wurde die Prototypensoftware aus der LECM auf der Elektronikhardware, der Injection Control Unit, implementiert. Der Fokus lag auf dem Testen der Schnittstellenkommunikation zwischen Applikationssoftware, Basissoftware und der Elektronikhardware.

Diese zweite Phase beinhaltet somit die Anbindung an das System Motor und lieferte als Resultat zusammen mit dem Injektor die Funktionsfähigkeit der Elektronikhardware und Software als Systemverbund für ein intelligentes, austauschbares Injektorgesamtsystem.

### 2.3. KRAFTSTOFFE UND VERSUCHSAUFBAU (EINZYLINDER, SPRAYKAMMER)

Im Rahmen des Verbundvorhabens werden mit Oxymethylenether (OME) und paraffinischem Diesel zwei repräsentative E-Fuels untersucht. Beide E-Fuels wurden jeweils als 30 % und 70 %-Blend mit Diesel nach DIN EN 590 bzgl. ihres Einspritz-, Verbrennungs- und Emissionsverhaltens untersucht. Die Kettenlänge des OMEs bestimmt maßgeblich das Siede- und Dichteverhalten. Als Basis für den paraffinischen Diesel wurde ein hydriertes Pflanzenöl verwendet, welches Fischer-Tropsch-Diesel stark ähnelt. Tabelle 1 zeigt wesentliche Unterschiede der E-Fuel-Diesel-Blends gegenüber normkonformem Dieselmotorkraftstoff. Auffällig ist auch der Sauerstoffgehalt im Gemisch, der mit steigendem OME-Anteil zunimmt. Die HVO-Blends zeigen im Energiegehalt kaum Unterschiede zum Normdiesel und sind durch ihre paraffinische Struktur sauerstoff- und aromatenfrei.

Tabelle 1: Eigenschaften der untersuchten Testkraftstoffe OME30, OME70, HVO30 und HVO70

Eigenschaft	Einheit	Diesel	OME30	OME70	HVO30	HVO70
Dichte @15 °C	kg/m <sup>3</sup>	837,1	896,9	975,8	817,0	798,0
Unterer Heizwert	J/g	42629	33894	26114	43022	43527
O-Gehalt	%	0,5	14,4	33,7	0,3	0,4

Um die Einflüsse der Testkraftstoffe auf das Motorverhalten zu beurteilen, wurden Versuche zur Einspritzcharakteristik an einem Einspritzverlaufsindikator und an einer Hochdruck-Hochtemperatur-Einspritzkammer der FVTR GmbH durchgeführt. Weiterhin konnten die Einflüsse der E-Fuel-Blends auf das Einspritzverhalten sowie auf die Verbrennung und Emissionsbildung an einem Einzylinder-Forschungsmotor der Universität Rostock untersucht werden. Die Motorversuche wurden in stationären Versuchen mit Variation verschiedener Betriebsparameter (Motorlast, Raildruck, Einspritzlage, etc.) durchgeführt.

## 2.4. KRAFTSTOFFE UND VERSUCHSAUFBAU (EINZYLINDER, SPRAYKAMMER)

### Spraykammeruntersuchung

Die physikalischen Eigenschaften der E-Fuels zeigen einen Einfluss auf den hydraulischen Betrieb des Injektors. Die Einspritzraten in Abbildung 7 verdeutlichen, dass ein steigender HVO-Gehalt zu einem früheren Beginn der Einspritzung führt. Im Gegensatz dazu bewirkt OME70 einen späteren Einspritzbeginn. Die Trajektorie von OME30 ist in den ersten 100  $\mu\text{s}$  deckungsgleich mit Dieselkraftstoff (DK). Dies führt dazu, dass die Förderkurven für OME70 im Bereich des ballistischen Betriebs unter die Kurven der anderen Kraftstoffe abfallen. Außerdem steigt mit zunehmendem OME-Gehalt das Maximum der Einspritzrate und damit die Steigung des Einspritzratenverlaufs, während für HVO nur ein sehr geringes Absinken der maximalen Einspritzrate und kaum eine Veränderung der Steigung der Einspritzrate zu verzeichnen ist. Dieses Verhalten ist zu einem großen Teil auf die Dichte der Kraftstoffe zurückzuführen. Obwohl OME mit einem höheren Massenstrom eingespritzt wird, muss die Einspritzdauer im Vergleich zu Dieselkraftstoff verlängert werden, um einen konstanten Eintrag an chemisch gebundener Energie zu erhalten, da gleichzeitig der Heizwert von OME abnimmt.

In Abbildung 7 sind die Zündzeiten für jeden Kraftstoff in Abhängigkeit von den Einspritzraten dargestellt. Die Verschiebung der Zündverzögerungen bei der Beimischung von E-Fuels ist eine Überlagerung mehrerer Effekte. Beispielsweise hat OME zwar eine höhere Cetanzahl als HVO, aber auch einen niedrigeren Heizwert. Daher muss mehr (und damit länger) Kraftstoff eingespritzt werden, um die gleiche Energiemenge zu erzeugen. HVO hingegen hat im Vergleich zu Diesel einen etwas höheren Heizwert, weshalb die Einspritzung kürzer sein kann. Trotz der etwas niedrigeren Cetanzahl führt dies zu einem früheren Zündbeginn als bei den OME-Gemischen.

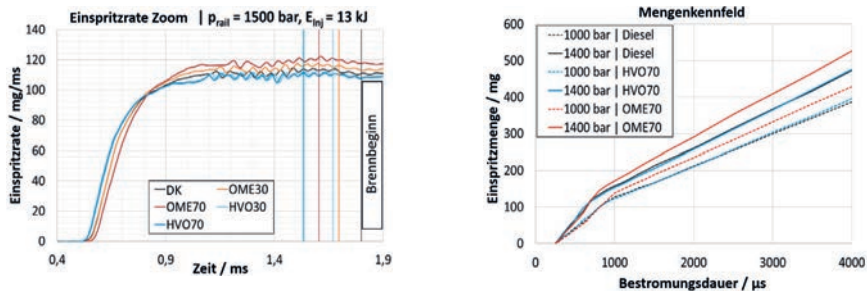


Abb. 7: Einspritzratenverläufe und Vergrößerung der ansteigenden Flanke der Einspritzraten für DK und 70 % E-Fuel-Gemische. Die Einspritzraten zeigen auch die Zündzeiten bei 825 K Gastemperatur und  $29\text{ kg/m}^3$  Gasdichte

Bei der Entwicklung der Flamme zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Kraftstoffen, insbesondere bei der Zumischung von OME. Einen Überblick über die gesamte Verbrennungssequenz geben die Histogrammbilder in Abbildung 8. Hier ist die erkannte Flammenfläche gegen die Zeit aufgetragen. Die Farben zeigen, ähnlich wie in einem



Histogramm, wie viel der Flammenfläche von welchen Temperaturen und KL-Faktoren (Rußkonzentrationen) eingenommen wird. Die Fläche, die von niedrigeren Temperaturen und KL-Faktoren eingenommen wird, ist in Richtung der x-Achse aufgetragen, die Fläche mit höheren Werten stapelt sich weiter von der Achse entfernt darüber.

Aufgrund der Ähnlichkeit von HVO und Diesel gibt es nur geringe Unterschiede in der Flammenstruktur. In Richtung der Einspritzdüse ist in der Mitte der Flamme ein kalter Bereich mit erhöhter Rußkonzentration zu erkennen. Durch die Verdampfung des Kraftstoffs wird der Flamme Wärme entzogen. Die Flamme ist an dieser Stelle kälter und sehr brennstoffreich, so dass sich zwar Ruß bilden kann, dieser aber noch nicht in gleichem Maße oxidiert. Während sich der Sprühstrahl entwickelt, sammeln sich unverbrannte Oxidationsprodukte in der Spitze des Sprühstrahls an, wo niedrige Sauerstoffkonzentrationen und hohe Temperaturen ebenfalls die weitere Bildung und das Wachstum von Rußpartikeln fördern. Die Temperaturen steigen langsam weiter an, da die Verbrennungszwischenprodukte bei der Diffusionsverbrennung in der vorderen Hälfte des Sprays oxidiert werden. Die Flammenfläche nimmt bis zum Ende der Einspritzung zu. Nach dem Ende der Einspritzung, das in Abbildung 8 durch eine schwarze Linie gekennzeichnet ist, nimmt die Ausdehnung der Flamme zunächst aufgrund des fehlenden Kraftstoffsprühens rasch ab, während sie in der Ausbrandphase deutlich langsamer wird. Diese Ausbrandphasen sind bei DK- und HVO-Gemischen ebenfalls sehr ähnlich.

Bei OME70 mit seinem geringeren Heizwert wird die schnellere Verbrennung durch die längere Einspritzzeit überkompensiert. Der Flammenkegel ist deutlich schmaler und weist niedrigere Maximaltemperaturen auf, bedingt durch den niedrigeren Energiegehalt von OME. Eine typische Flammenform bildet sich nicht mehr aus. Die wahrscheinliche Ursache dafür ist, dass die Reaktionsgeschwindigkeit durch den kraftstoffgebundenen Sauerstoff so hoch ist, dass der Brennstoff bereits sehr nahe am Flüssigbrennstoffstrahl verbrennt und sich keine Zwischenprodukte mehr ansammeln, die die typische Keule bilden könnten.

Da durch die OME mehr Sauerstoff in die Flammenzone eingebracht wird, wird die Bildung von brennstoffreichen Bereichen wirksam verhindert. So ergibt sich während der gesamten Verbrennung eine konstant niedrige Rußkonzentration in allen Bereichen der Flamme.

Das Maximum der Flammenausdehnung wird bei OME70 bereits sehr früh erreicht. Sobald die vorgemischte Menge oxidiert ist, wird nur noch der nachströmende Kraftstoff verbrannt. Die Ausdehnung der Flamme nimmt sogar noch leicht ab. Sehr früh erreicht die Verbrennung einen quasistationären Zustand zwischen Brennstoffverbrennung und nachströmendem Brennstoff. Nach dem Ende der Einspritzung unterscheidet sich die Ausbrennphase von OME70 deutlich von der von DK und HVO70; die sichtbare Verbrennung von OME70 endet fast sofort nach EOI.

Bei OME70 sind die Spitzentemperaturen im Vergleich zu HVO70 und Dieselkraftstoff sogar etwas höher, und die Gesamtverteilung der Temperaturen ist sehr homogen. Die hohe Reaktionsgeschwindigkeit, insbesondere zu Beginn, führt möglicherweise dazu, dass sich

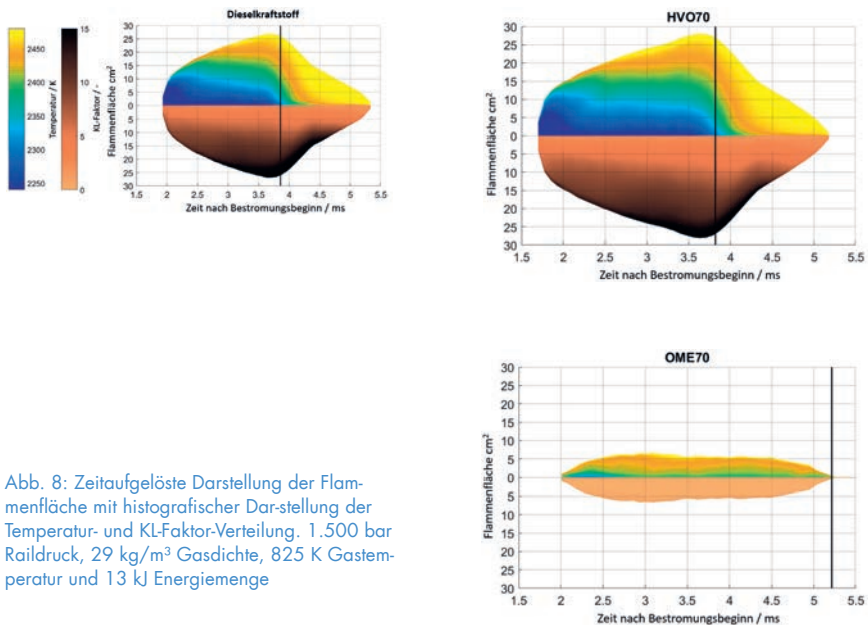


Abb. 8: Zeit aufgelöste Darstellung der Flammenfläche mit histogrammischer Darstellung der Temperatur- und KL-Faktor-Verteilung. 1.500 bar Raildruck, 29 kg/m<sup>3</sup> Gasdichte, 825 K Gastemperatur und 13 kJ Energiemenge

das Gleichgewicht zwischen Wärmestrom aus der Reaktionszone und freigesetzter Verbrennungsenthalpie zu höheren Temperaturen hin verschiebt. Dasselbe gilt für die Rußkonzentration, die ebenfalls auf einem sehr niedrigen Niveau liegt.

### Einzyylinder-Motorversuche

Abbildung 10 zeigt den Betrieb des Motors bei 50 % Last und konstantem SOE-Zeitpunkt (Beginn der Injektorbestromung). Der mittlere effektive Bremsdruck wurde für alle Kraftstoffe konstant gehalten, was bei OME30 und OME70 aufgrund ihres geringeren Energiegehalts zu einer längeren DOE (Bestromungsdauer) führt. Aufgrund der höheren Cetanzahl von OME lässt sich bei OME30 und OME70 eine geringfügig frühere Zündung anhand des Brennverlaufs feststellen. Im Vergleich zum Referenzdiesel ist die maximale Wärmefreisetzung während der Premix-Phase und der diffusen Verbrennungsphase bei OME70 vor allem aufgrund des niedrigeren Heizwertes geringer. Die Auswirkungen bei OME30 sind im Allgemeinen die gleichen, aber weniger stark ausgeprägt. Die Diffusionsphase ist bei OME30 und OME70 deutlich länger, aber die Brenndauer ist im Vergleich zum Referenzdiesel kürzer, was bedeutet, dass der Restbrennstoff in der Nachverbrennungsphase aufgrund des im Kraftstoff gebundenen Sauerstoffs schneller verbrennt. Die geringere maximale Wärmefreisetzung bei OME30/OME70 korrespondiert auch mit einer Abnahme des Spitzendrucks.

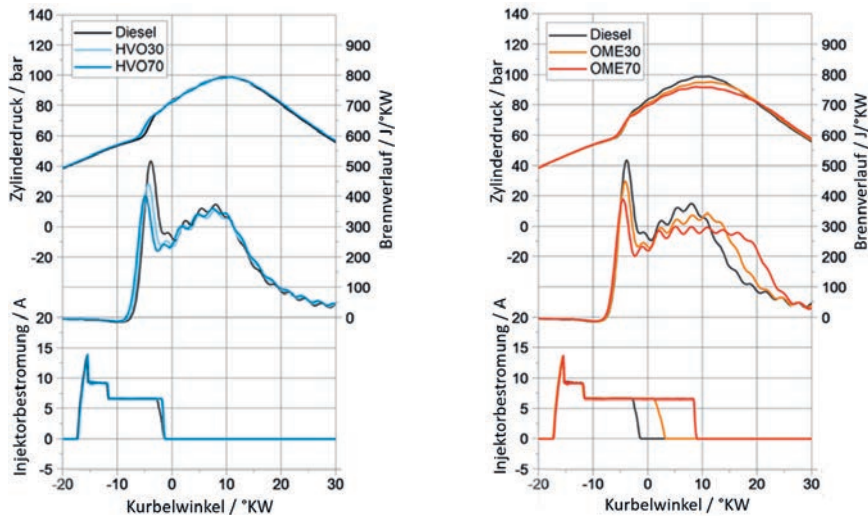


Abb. 9: Einfluss E-Fuel-Blends auf die Verbrennung bei 1,500 min<sup>-1</sup>, 50 % Motorlast, 900 bar Raildruck, -17,5 °KW SOE

Der Betrieb mit HVO-Kraftstoffgemischen hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Einspritzregelung. Aufgrund der höheren Cetanzahl von HVO ist der Zündverzögerung deutlich geringer, was zu einer weniger ausgeprägten Vormischphase führt. Der weitere Verbrennungsverlauf zeigt keine wesentlichen Unterschiede zwischen Diesel- und HVO-Mischungen.

Abbildung 9 zeigt die Auswirkung der Variation des Raildrucks auf die NO<sub>x</sub>- und Rußemissionen bei 50 % Motorlast. Die Beimischung von HVO zu Dieselkraftstoff verbessert das NO<sub>x</sub>-Verhalten leicht. Darüber hinaus ist die Verbesserung der NO<sub>x</sub>-Emissionen noch ausgeprägter, wenn der Raildruck erhöht wird. Gleichzeitig hemmt der Mangel an aromatischen Strukturen in HVO die Bildung von Rußvorläuferstrukturen, so dass die Rußemissionen sinken. Dieser Effekt ist bei Betriebspunkten mit höherer Filterrauchzahl im Dieseltreibetrieb noch stärker ausgeprägt. Darüber hinaus trägt der niedrigere Endsiedepunkt von HVO dazu bei, den Kraftstoff schneller zu verdampfen, so dass lokale kraftstoffreiche Zonen verringert werden.

Der Betrieb mit OME-Mischungen zeigt, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen bei OME30 leicht erhöht sind, bei OME70 jedoch ähnlich wie beim Dieseltreibetrieb. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist in der Flammenstruktur zu finden. Die OME30-Flamme hat sichtbar niedrigere Temperaturen, aber wahrscheinlich auch einen deutlich höheren Sauerstoffgehalt (geringe Rußkonzentration). Die breite Ausdehnung der Flamme deutet jedoch darauf hin, dass eine Vermischung mit der Kammeratmosphäre in fast gleichem Maße wie bei reinem DK stattfindet. Somit ist neben Stickstoff auch ausreichend Sauerstoff für die NO<sub>x</sub>-Bildung vorhanden. OME70 hat dagegen eine deutlich kleinere Reaktionszone. Außerdem ist davon auszugehen, dass aufgrund des sehr hohen Sauerstoffgehalts deutlich weniger Luft in

das Kraftstoffspray eingebracht werden muss, um eine vollständige Oxidation zu ermöglichen. Infolgedessen befindet sich auch weniger Stickstoff in der Reaktionszone. Obwohl die Flamme heißer sein kann, wird die Stickoxidbildung durch das Flammenvolumen und die Konzentration der Reaktanten so weit begrenzt, dass sie unter den Werten der reinen DK-Verbrennung liegt.

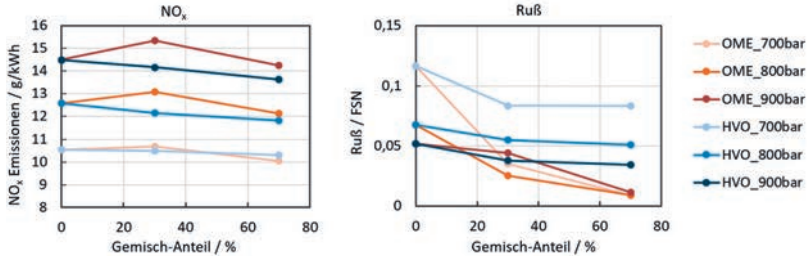


Abb. 10: Einfluss der E-Fuels-Blends auf das Emissionsverhalten bei 1.500 min<sup>-1</sup>, 50 % Last

Eine Erklärung für die niedrigeren NO<sub>x</sub>-Emissionen im Motorversuch kann in der deutlich verlängerten Einspritzzeit von OME70 gefunden werden. Da sich der Verbrennungsschwerpunkt bei gleichbleibender Gesamtverbrennungsdauer nach spät verschiebt, wird mehr Kraftstoff bei niedrigeren globalen Gastemperaturen oxidiert. Dies stellt auch einen wesentlichen Unterschied zwischen Motor- und Einspritzkammermessungen dar, da die Gastemperaturen und -drücke in der Einspritzkammer konstant sind. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen des Motors lassen sich daher schwerer aus den Ergebnissen der Einspritzkammer erklären als die Rußemissionen. Die Auswirkungen der Rußreduzierung durch den kraftstoffgebundenen Sauerstoff, der lokale kraftstoffreiche Zonen reduziert und die anschließende Rußoxidation fördert, sind am Motor und in der Einspritzkammer sehr ähnlich.

## 2.5. GESAMTMOTORMODELL

Die AVL Deutschland GmbH widmete sich im Rahmen ihres Arbeitspakets der Abbildung der emissions- und verbrauchsrelevanten Komponenten des Großmotorsystems als Simulationsmodelle. Hiermit wurde es technisch möglich gemacht, auf virtueller Ebene zu untersuchen, wie ein repräsentatives Großmotorsystem qualitativ auf veränderte Randbedingungen im Betrieb, z.B. hinsichtlich Kraftstoffzusammensetzung oder Einspritzstrategie, reagiert.

Es wurde auf Basis realer Einzylinderdaten ein echtzeitfähiges, kurbelwinkelaufgelöstes Systemmodell bestehend aus Zylinder-, Verbrennungs- und Injektormodell aufgebaut. Das Modell basiert auf einem nulldimensionalen Ansatz für die Zylinderdarstellung. Dabei findet eine Einteilung der Brennkammer in zwei Zonen statt. Zusätzlich berücksichtigt das Verbrennungsmodell den Zündverzug und unterscheidet zwischen den freigesetzten Wärmeanteilen aus der Vormischflammenverbrennung und der Diffusionsflammenverbrennung.

Daneben wurde ein Einspritzsystemmodell mit vereinfachter Hydraulik entwickelt, welches basierend auf Einspritztiming und -druck sowohl für Einfach- als auch Mehrfacheinspritz-

vorgänge die tatsächliche Einspritzrate und den resultierenden Kraftstoffmassenstrom in die Brennkammer berechnet.

Das Verbrennungsmodell wurde anhand von Einzylindermessdaten kalibriert. Hierbei wurden die relevanten Modellparameter detektiert und im Rahmen eines Optimierungsproblems als Designvariablen definiert. Die Abweichung zwischen den vom Modell berechneten Zylinderdruckkurven und den Referenzkurven wurde als Optimierungs-Kostenfunktion mit dem Ziel der Kostenfunktionsminimierung definiert. Daraus resultierte ein System-Simulationsmodell, welches das Verhalten des realen Prüfstands über einen definierten Betriebsbereich im reinen Dieselmotorbetrieb abbilden kann.

Auf qualitativer Ebene wurde das Modell auch hinsichtlich des Einflusses der Kraftstoffzusammensetzung auf das Ansprechverhalten untersucht. Kraftstoffmodelle konnten in vereinfachter Form mithilfe von Bordmitteln eingebunden werden. Hiermit konnte veranschaulicht werden, dass die Zumischung des strombasierten Kraftstoffs DMM3 zum Standarddieselmotor eine Verringerung des Brennwertes und folglich eine Verringerung des Zylinderdrucks und der Wärmefreisetzungsrate zur Folge hatte. Ebenfalls führte dies zu veränderten Stoffzusammensetzungen im Rohabgasstrom.

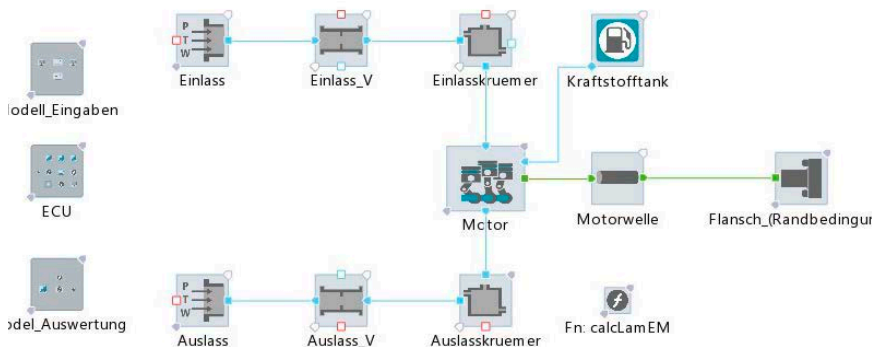


Abb. 11: Topologie des aufgebauten Systemmodells

## ZUSAMMENFASSUNG

Die hier in Ausschnitten vorgestellten Projektergebnisse zeigen, dass die Entwicklung einer Hard- und Software für ein intelligentes, tauschbares Injektorsystem welches zusätzlich eine Upgrade-Möglichkeit für bestehende Motoren bietet, ein neutrales Verbrennungsverhalten auch bei unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten ermöglicht. Zudem kann der mechanische Verschleiß des Injektors durch die Intelligenz analysiert und kompensiert werden.

Aufgrund der weiter fortschreitenden Herausforderungen an Kraftstoffverbrauch und Emissionen ist solch eine Intelligenz notwendig, um mechanische Toleranzen zu kompensieren, einem unterschiedlichen Verbrennungsverhalten durch den Einfluss von Kraftstoffen entgegenzuwirken sowie rechtzeitig auf einen durch Verschleiß nicht mehr lauffähigen Injektor hinzuweisen.

Die Motorergebnisse zeigen ein qualitativ hochwertiges Drop-in-Verhalten von HVO-Gemischen mit vernachlässigbaren Auswirkungen auf die Einspritzsteuerung und positiven Effekten in Form eines geringeren Zündverzugs und einer geringeren Rußemission. OME-Gemische beeinflussen aufgrund ihrer Kraftstoffeigenschaften die Einspritzsteuerung und die Nadeldynamik erheblich. Die Motortests zeigten, dass ein mit E-Fuel optimierter Verbrennungsprozess die Motoreffizienz steigern kann. Zukünftige Motorsteuerungssysteme werden sich diese vorteilhaften Eigenschaften von E-Fuels zunutze machen.

Im Rahmen der Simulationsumfänge konnte ein Systemmodell entwickelt werden, welches mit der Drehzahl, dem Raildruck im Injektorsystem, dem Einspritzsignal, der Zusammensetzung der binären Kraftstoffmischung und dem angeforderten Motordrehmoment als Aktuatorikgrößen das transiente and stationäre Ansprechverhalten des Motorsystems simuliert und als prädiktives Regelstreckenmodell das Potenzial zu einer Entwicklungsplattform für die Steuerfunktionsentwicklung besitzt.

## **DANKSAGUNG**

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, die das Verbundprojekt ISystem4EFuel durch die Förderung ermöglicht haben, sowie dem Projektträger Jülich für die gute administrative Unterstützung während der Projektlaufzeit.

## LITERATUR

- [1] Teichmann R., Wimmer A. (2018) Druckverlaufsanalyse. In: Merker G., Teichmann R. (eds) Grundlagen Verbrennungsmotoren. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden.

## 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. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-624-8
2. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK  
Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-677-4
3. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK  
Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-745-0
4. STATUSTAGUNG SCHIFFFAHRT UND MEERESTECHNIK  
Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-832-7
5. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN  
Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-922-5
6. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN  
Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-006-7
7. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN  
Tagungsband der Statustagung 2015 (2015), 196 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-104-0
8. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN  
Tagungsband der Statustagung 2016 (2016), 220 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-187-3
9. STATUSSEMINAR MEERESFORSCHUNG mit FS SONNE  
14.–15. Februar 2017 in Oldenburg–Tagungsband (2017), 221 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-207-8
10. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN  
Tagungsband der Statustagung 2017 (2017), 224 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-277-1
11. STATUSTAGUNG MARITIME TECHNOLOGIEN  
Tagungsband der Statustagung 2018 (2018), 224 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-366-2



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