

HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT GMBH

THE HAMBURG SHIP MODEL BASIN

Bericht Nr. HSVA-2024-003

**MarTERA - Twin-CRP-POD ULCS:
Modellversuchstechnik für innovative
Propulsionskonzepte**

MarTERA

Schlussbericht

Gefördert durch:



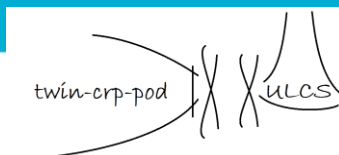
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen 03SX520A

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima unter dem Förderkennzeichen 03SX520A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

HSVA



HSVA-2024-003**MarTERA - Twin-CRP-POD ULCS:
Modellversuchstechnik für innovative Propulsionskonzepte****Schlussbericht****Förderkennzeichen 03SX520A****Auftraggeber:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
(BMWK)****Auftragnehmer:
Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH
Bramfelder Straße 164
D-22305 Hamburg, Germany**

Hamburg, Oktober 2024

Erstellt von:

i.A. J. Wagner

**HAMBURGISCHE SCHIFFBAU-
VERSUCHSANSTALT GmbH**

i.V. J. Lassen

Berichtsblatt

1. ISBN	2. Berichtsart Schlussbericht	3.
4. Titel des Berichts MarTERA - Twin-CRP-POD ULCS: Modellversuchstechnik für innovative Propulsionskonzepte		
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) (Wagner, Jonas)		6. Abschlussdatum des Vorhabens 29.02.2024
		7. Veröffentlichungsdatum 26.10.2024
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH Bramfelder Straße 164 D-22305 Hamburg		9. Ber. Nr. Durchführende Institution HSVA-2024-003
		10. Förderkennzeichen 03SX520A
		11. Seitenzahl 33
		12. Literaturangaben 12
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhorststr. 34-37 11019 Berlin		14. Tabellen 0
		15. Abbildungen 19
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Vorschau Das Projekt <i>Modellversuchstechnik für Innovative Propulsionskonzepte</i> ist Teil des MarTERA Verbundvorhabens <i>Twin-CRP-POD ULCS</i> , in dem ein neuartiges Propulsionskonzept für sehr große Containerschiffe (ULCS) entwickelt wurde. Dabei handelt es sich um eine kontrarotierende Propelleranordnung aus der Kombination eines Hauptpropellers und eines POD-Antriebs, wobei das System als Doppel-Wellenanlage ausgelegt ist. Die HSVA hat in diesem Projekt eine spezielle Modellversuchstechnik zur Untersuchung der hydrodynamischen Eigenschaften entwickelt, welche eine Untersuchung der Effektivität dieses neuen Konzeptes mit bisher im Modellversuch nicht erreichbarer Genauigkeit ermöglicht. Dafür wurden neben Widerstands- und Propulsionsversuche im großen Schlepptank auch Versuche im Kavitationstunnel der HSVA (HYKAT) durchgeführt, da nur dort Versuche bei großausführungsrelevanten Reynoldszahlen möglich sind. Auf diese Weise wurden die Verfälschung der Ergebnisse durch überzeichnete Zähigkeitseffekte minimiert, wie sie bei konventionellen Propulsionsversuchen unter Froude'scher Ähnlichkeit in einem Schlepptank auftreten würden. Die im Zuge des Projekts neu entwickelte und implementierte Versuchstechnik wird auch nach Projektende im Rahmen der kommerziellen Tätigkeiten der HSVA eingesetzt werden und ermöglicht es der HSVA, ihr Versuchsportfolio insbesondere im zunehmend relevanten Bereich unkonventioneller Propulsionskonzepte zu erweitern, womit das Projekt einen wichtigen Beitrag für die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens leistet.		

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt zusammenfassend die wesentlichen Ergebnisse der während des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen in der HSVA sowie die der nationalen Partner.

Folgende Ergebnisse wurden in den jeweiligen Arbeitspaketen erzielt:

AP 1.1: Analyse und Aufbereitung der relevanten technisch-wissenschaftlichen Grundlagen zu Modellversuchen und unkonventionellen Propulsionsanordnungen.

AP 1.2: Analyse und Erklärung der Modell Versuchsergebnisse für die abschließende Machbarkeitsanalyse des Gesamtkonzepts.

AP 3.2: Erfolgreiche Vorbereitung und Durchführung von Modellversuchen im großen Schlepptank sowie im Kavitationstunnel (HYKAT) inklusive Modell- und Propellerherstellung. Darüber hinaus Entwicklung, Bau und Einsatz spezieller, auf die Anforderungen des Vorhabens zugeschnittener Messtechnik.

AP 3.3: Ermittlung der auf den im großen Schlepptank durchgeführten Modellversuchen basierenden Propulsionsprognose und Weitergabe der Daten an die Partner, um mit Hilfe numerischer Berechnungen vergleichende Propulsionszustände auf unterschiedlichen Maßstäben (inklusive Full-Scale) zu berechnen und zu analysieren.

19. Schlagwörter **Modellversuchstechnik, CR-POD, Propulsionsversuche mit Schubmessung bei hohen Reynoldszahlen**

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN	2. Type of Report Final Report	3.
4. Report Title MarTERA - Twin-CRP-POD ULCS: Model Test Technology for innovative Propulsion Concepts		
5. Authors (Family Name, First Name(s)) (Wagner, Jonas)		6. End of Project 29.02.2024
		7. Publication Date 26.10.2024
8. Performing Organisation(s) (Name, Address) Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH Bramfelder Straße 164 D-22305 Hamburg BRD		9. Originator's Report No. HSVA-2024-003
		10. Reference No. 03SX520A
		11. No. of Pages 33
		12. No. of References 12
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Scharnhorststr. 34-37 11019 Berlin		14. No. of Tables 0
		15. No. of Figures 19
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract <p>The project <i>Model Testing Technology for Innovative Propulsion Concepts</i> is part of the MarTERA joint research project <i>Twin-CRP-POD ULCS</i>, in which a new type of propulsion concept for very large container ships (ULCS) was developed. This concept consists of a contra-rotating propeller arrangement that combines a main propeller and a POD drive, whereby the system is designed as a twin-shaft system.</p> <p>In this project, HSVA has developed a special model test technique for investigating the hydrodynamic properties, which enables to investigate the effectiveness of this new concept with an accuracy previously unattainable in model tests. In addition to resistance and propulsion tests in the large towing tank, model tests were also carried out in the large cavitation tunnel of the HSVA (HYKAT), as this is the only place where tests at large Reynolds numbers are possible. In this way, errors in the results due to exaggerated viscosity effects, which would occur in conventional propulsion tests under Froude's similarity in a towing tank, were minimized.</p> <p>The new test technology developed and implemented in the course of the project will also be used after the end of the project as part of HSVA's commercial activities and will enable HSVA to expand its test portfolio, particularly in the increasingly relevant area of unconventional propulsion concepts, thus making an important contribution to the competitiveness of the industry.</p> <p>This final report highlights the most important findings of HSVA and its national partners that have been made within the course of this project.</p> <p>The following results have been achieved in the respective workpackages:</p>		

WP 1.1: Analysis and preparation of relevant technical and scientific fundamentals for model tests and unconventional propulsion systems.

WP 1.2: Analysis and explanation of the model test results for the final feasibility study on the overall concept.

WP 3.2: Successful preparation and implementation of model tests in both the large towing tank and the cavitation tunnel (HYKAT), including the production of the model as well as the propeller. Additionally, development, construction and use of special measurement technology tailored to the requirements of the project.

WP 3.3: Determination of the propulsion performance prognosis based on the model tests carried out in the large towing tank. Transfer of the data to the partners in order to calculate and analyze comparative propulsion set-ups on different scales (including full-scale) with the help of numerical calculations.

19. Keywords **Model Tests, CR-POD, Propulsion Tests with Thrust Measurement at high Reynolds Numbers**

20. Publisher

21. Price

VORWORT

Das vorliegende Dokument stellt den Schlussbericht für das Verbundvorhaben *Twin-CRP-POD ULCS: Modellversuchstechnik für Innovative Propulsionskonzepte* dar, welches im Rahmen des Förderprogramms

MarTERA - Maritime and Marine Technologies for a new ERA

durchgeführt wurde.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03SX520A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	9
1.1	Motivation und Voraussetzungen	9
1.2	Aufgabenstellung	9
1.3	Vorhabensvoraussetzungen	11
1.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	11
1.5	Stand der Technik	11
1.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
2	Eingehende Darstellung der Ergebnisse	14
2.1	Arbeitspaket 1.1: Rules Analysis, Scientific Progress and Modifications	14
2.2	Arbeitspaket 1.2: Feasibility Evaluation	14
2.3	Arbeitspaket 3.2: Model Tests	14
2.3.1	Entwicklung und Bau einer Schubmesswaage für den HYKAT	14
2.3.2	Entwurf der Drehmomentenmessung im Antriebsstrang bei Propulsionsversuchen im großen Schlepptank	15
2.3.3	Entwurf einer Einrichtung zur Durchführung von CR-POD Freifahrten	17
2.3.4	Modellversuche.....	19
2.4	Arbeitspaket 3.3: Extrapolationsmethode	27
2.5	Zusammenfassung der Arbeiten der nationalen Partner	28
2.5.1	CMT	28
2.5.2	Piening Propeller:.....	29
2.6	Zusammenfassung der Arbeiten der internationalen Partner	30
2.7	Zahlenmäßiger Nachweis.....	31
2.8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	31
2.9	Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse	31
2.10	Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	32
2.11	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	32
3	Quellenverzeichnis	33
4	Abbildungsverzeichnis	33

1 Kurzdarstellung

1.1 Motivation und Voraussetzungen

Das Teilvorhaben *Modellversuchstechnik für Innovative Propulsionskonzepte* ist Teil des MarTERA-Verbundvorhabens *Twin-CRP-POD ULCS*. Die Motivation des Vorhabens liegt in der Reduzierung des Treibstoffverbrauches und der Emissionen sehr großer Containerschiffe unter Verwendung einer hybriden Propulsionsanordnung mittels zweier contra-rotierender Propellerpaare, von denen der jeweils vordere über eine Welle aus dem Schiff heraus, und der jeweils hintere mittels eines E-Motors gegenläufig aus einer dahinter angeordneten POD-Gondel heraus angetrieben wird. Da die einzelnen Komponenten bereits am Markt verfügbar sind, zielt das Vorhaben somit weniger auf Grundlagenforschung und technische Neuentwicklungen, sondern vielmehr darauf ab, existierende propulsionsverbessernde Maßnahmen in einem neuartigen Konzept in optimaler Weise miteinander zu verbinden. Neben der Effizienzsteigerung birgt das Konzept darüber hinaus Potentiale für eine verbesserte Manövrierfähigkeit und eine gesteigerte Ausfallsicherheit, was ebenfalls im Rahmen des Vorhabens untersucht werden soll. Neben technischen Aspekten soll dabei auch die ökonomische Sicht beleuchtet werden.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung für die HSVA besteht darin, das neuartige Propulsionskonzept an einem Beispielfall (ein 396 m langes 16.000 TEU Containerschiff) anzuwenden und die Änderungen im Leistungsbedarf gegenüber etablierter Anordnungen zu vergleichen. Dazu musste neue Modellversuchstechnik entwickelt und gebaut werden, um die geplante Anordnung von POD-Antrieben hinter den Hauptpropellern einer Zweischrauberanlage betreiben und die propulsionsrelevanten Größen messen zu können. Dies sollte sowohl im Schlepptank der HSVA, als auch im großen Umlauftank (HYKAT) möglich sein, um das System auch bei großausführungsrelevanten Reynoldszahlen untersuchen zu können. Eine besondere Herausforderung stellen in diesem Zusammenhang nicht nur die Druckwasserdichtigkeit für den Betrieb der Messtechnik im HYKAT, sondern auch der realisierbare Maßstab des ausgewählten Projektschiffes dar.

Die HSVA ist in mehreren Arbeitspaketen involviert, woraus die folgenden Aufgabenstellungen resultieren:

Arbeitspaket 1.1: Rules Analysis, Scientific Progress Monitoring and Modifications

Mit der Analyse und Bündelung der wissenschaftlichen Grundlagen legt dieses Arbeitspaket die Basis für alle nachfolgenden Arbeitspakete. Die HSVA soll im Zuge dessen vor Allem ihre Erfahrungen mit den hydrodynamischen Eigenschaften der jeweiligen Einzelkomponenten einbringen. Darüber hinaus soll als Begleitaufgabe über die gesamte Laufzeit des Vorhabens sichergestellt werden, dass stets die aktuellsten Erkenntnisse aus dem Vorhaben als auch generell auf dem Gebiet der Hydrodynamik in das Projekt einfließen.

Arbeitspaket 1.2: Feasibility Evaluation

Die HSVA trägt zur abschließenden Machbarkeitsstudie bei, indem sie die Ergebnisse aus den Modellversuchen (AP 3.2) mit den in AP 3.3 entwickelten Methoden auf die Großausführung umrechnet, darstellt und analysiert.

Arbeitspaket 3.2: Model Tests:

AP 3.2 stellt mit der Durchführung von Modellversuchen sowohl im Schlepptank als auch im HYKAT die Kernaufgabe der HSVA im Verbundvorhaben dar. Im Einzelnen beinhaltet dies folgende Arbeitsschritte:

- Herstellung eines Schiffmodells mit zwei Hinterschiffsvarianten – einer klassischen Einschrauber-Variante (Referenz) sowie einer dem neuen Konzept folgenden Variante mit zwei konventionellen Wellen in Kombination mit jeweils dahinter angeordneten POD-Antrieben;
- Herstellung eines Modellpropellers für die Referenz-Variante;
- Herstellung von vier Propellermodellen für die Twin-CRP-POD-Variante;
- Schlepptankversuche mit beiden Varianten:
 - Nachstrommessungen;
 - Widerstandsversuche;
 - Propulsionsversuche;
- Entwicklung einer Messtechnik zur Erfassung des POD-Systemschubes im HYKAT;
- Versuche mit beiden Modellvarianten im Hydrodynamik- und Kavitationstunnel HYKAT:
 - Kavitationsversuche;
 - Druckschwankungsmessungen;
 - vergleichende Propulsionsversuche bei hohen Reynoldszahlen.

Die Ergebnisse dieser Versuche gehen einerseits in die abschließende Machbarkeitsanalyse ein (siehe AP 1.2), zum anderen dienen sie den Verbundpartnern für die Validierung der CFD-Simulationen.

Die Kavitations- und Druckschwankungsergebnisse sowie die konventionell ausgewerteten Propulsionsversuchsergebnisse aus dem Schlepptank werden im *Report on Hydrodynamic Tests* zusammengefasst, welcher unter der Federführung der HSVA entsteht. Die Modellergebnisse der vergleichenden Propulsionsversuche im HYKAT hingegen bilden den Input für die Untersuchungen in Arbeitspaket 3.3.

Arbeitspaket 3.3: Extrapolation Method

In diesem Arbeitspaket werden die im HYKAT durchgeführten, vergleichenden Propulsionsversuche hinsichtlich der Reynoldszahl-Abhängigkeit der Ergebnisse analysiert. Während sich die Technik vergleichender Propulsionsversuche bei hohen Reynoldszahlen im HYKAT im Fall asymmetrischer Rudervarianten, kleinerer Propellergeometrievariationen oder Propeller-Nabenkappenflossen bereits bewährt hat, besteht im Fall des Twin-CRP-POD-Konzeptes die Schwierigkeit, dass sich die von der kontra-rotierenden Propeller-POD-Einheit induzierte Widerstandszunahme am Schiffskörper von der eines konventionellen Einschraubers unterscheiden wird. Ziel des Arbeitspakets ist es deshalb, ein entsprechendes Konzept zur Extrapolation der Messergebnisse auf die Großausführung zu entwickeln.

Als Ergebnis entstehen verlässliche Aussagen über die hydrodynamische Effizienzsteigerung für einen großausführungsrelevanten Reynoldszahl-Bereich, die in die Ergebnisse von AP 1.2 eingehen werden.

1.3 Vorhabensvoraussetzungen

Die 1913 gegründete Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA) ist ein etabliertes Beratungs- und Forschungsunternehmen für die maritime Industrie, das über große Erfahrung im Entwurf und in der Analyse von Schiffsrümpfen und schiffbaulicher Komponenten verfügt. Durch die große Zahl an Kontakten zu Kunden, Dienstleistern und Forschungseinrichtungen hat die HSVA einen guten Einblick in Bedürfnisse und Entwicklungspotentiale im Bereich der maritimen Fragestellungen wie Propulsion, Manövrieren und Seeverhalten. Die HSVA hat bereits in der Vergangenheit zahlreiche national und international geförderte Forschungsvorhaben erfolgreich durchgeführt, und verfügt dementsprechend über das geeignete Fachpersonal zur wissenschaftlichen und administrativen Bearbeitung.

Zur Erreichung ihrer Aufgaben stehen der HSVA moderne Versuchsanlagen, umfangreiche Erfahrungen im Entwerfen, Optimieren und Testen von Schiffen und Propellern, leistungsstarke Werk- und Fertigungsstätten sowie eine erfahrene Konstruktionsabteilung zur Verfügung.

Im Projekt Twin-Crp-Pod ULCS kamen versuchsseitig der große Schlepptank sowie der hydroakustische Kavitationstank (HYKAT) zum Einsatz. Modelle und Propeller wurden in den HSVA-eigenen Werkstätten gefertigt, gleiches gilt für die von der HSVA entwickelte Messtechnik.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Gesamtlaufzeit des Vorhabens betrug 36 Monate. Insgesamt ist das Projekt in vier Arbeitspakete unterteilt, die jeweils in sich abgeschlossene Fragestellungen adressieren und mehrere klar definierte Ziele beinhalten. Jedes Arbeitspaket wurde von einem Partner geleitet, die Bearbeitung erfolgte entsprechend dem im HSVA-Teil Antrag dargelegten Arbeitsplan und unter Einbeziehung aller beteiligten Projektpartner.

Maßgeblich für die HSVA war vor Allem die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Modellversuche sowie die zugehörige Entwicklung der dafür benötigten Messtechnik in Arbeitspaket 3.2. Der geplante Zeitrahmen für diese Arbeiten erstreckte sich vom 6. bis zum 24. Monat. Aufgrund der Ergebnisse der ersten Versuchsserie wurde jedoch im Konsortium entschieden, das Versuchsprogramm zu modifizieren (Wiederholung der Versuche mit einer geänderten Rumpfgeometrie anstatt Versuche mit Designpropellern), wodurch das Hinterschiff des Modells nicht nur neu designt, sondern auch gefertigt werden musste. Um diesen Änderungen Rechnung zu tragen, wurde die Laufzeit sowohl des Gesamtvorhabens als auch des Arbeitspakets 3 kostenneutral um sechs Monate verlängert.

Trotz einiger Corona-bedingter Verzögerungen konnten sämtliche geplanten Arbeiten im Rahmen der verlängerten Projektlaufzeit abgeschlossen werden.

1.5 Stand der Technik

Die Einzelkomponenten der Propulsionsanordnung, sowie deren Vor- und Nachteile sind bereits bekannt und entsprechend weit verbreitet. So werden Zweischrauber-Anordnungen verwendet, sobald der Propellerdurchmesser, z.B. aufgrund von Tiefgangsbeschränkungen nicht weiter vergrößert werden kann, das Schiff aber dennoch einen hohen Schubbedarf aufweist. Azimuth- bzw. POD-Antriebe werden bevorzugt auf Schiffen mit hohem Manövrierbedarf verwendet, während konträrrotierende Propelleranordnungen Effizienzsteigerungen und damit einhergehend

Treibstoffersparnisse ermöglichen. Die Einzellösungen wurden in der Vergangenheit erfolgreich verwendet, bislang wurden diese jedoch noch nicht in einer einzelnen Propulsionsanordnung kombiniert.

Die versuchstechnische Ermittlung der Effizienz von Propulsionssystemen findet in der Regel unter Einhaltung der Froude'schen Ähnlichkeit in Schlepptanks bei vergleichsweise kleinen Geschwindigkeiten statt. Dies führt dazu, dass alle viskosen Effekte erheblich überzeichnet werden. So ist nicht nur die relative Grenzschichtdicke größer als am realen Schiff, sondern auch Strömungsablösungen werden durch die zu kleine Reynoldszahl begünstigt. In der Folge sind die Geschwindigkeitsschwankungen in der Propellerzuströmung, der sogenannte Schiffsnachstrom, überzeichnet und der Reibungswiderstandsbeiwert überhöht. Während die Strömung am Modell-Schiffsrumpf mittels sogenannter Turbulenzerzeuger (Sandstreifen, Nagelreihen, etc.) vom Bug an in einen wirklichkeitsnahen, turbulenten Strömungszustand gezwungen werden kann, können sich am Modellpropeller bei Froude'scher Ähnlichkeit noch unrealistische Laminarbereiche ausbilden. Aus diesen Gründen wird der Schiffswiderstand in einen Reibungs- und einen Wellenanteil aufgespalten, von denen nur der Wellenwiderstand durch den Schlepptankversuch ermittelt wird. Der Propellerwirkungsgrad wird in einem zusätzlichen Modellversuch (Propeller-Freifahrt) in homogener Zuströmung bei höchstmöglicher Modellpropellerdrehzahl, d.h. unter Missachtung der Froude'schen Ähnlichkeit ermittelt und in das Schlepptank-Versuchsergebnis eingerechnet. Zusätzlich beinhaltet der Skalierungsprozess der Modellversuchsergebnisse zu Großausführungswerten eine Reihe weiterer (halb-) empirischer Korrekturen, um die Maßstabeffekte möglichst realistisch zu erfassen. Da es sich dabei aber lediglich um empirische Korrekturen handelt, sind insbesondere detaillierte Vergleiche unterschiedlicher Propulsionskonzepte mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Zur Ermittlung des Einflusses kleinerer Optimierungsmaßnahmen an Propeller oder Ruder (wie etwa der Installation von Nabenkappenflossen, Ruder-Asymmetrien, etc.) hat die HSVA in den vergangenen Jahren in Eigenleistung ein Verfahren entwickelt, mit dessen deren Einfluss auf den Leistungsbedarf bei hohen Reynoldszahlen im HYKAT der HSVA ermittelt werden kann. Diese neue Versuchstechnik überkommt die oben geschilderten Probleme weitestgehend und wird auch im kommerziellen Betrieb erfolgreich eingesetzt. Leider setzt das Verfahren voraus, dass die Wechselwirkung zwischen Rumpf und Propeller, ausgedrückt durch die sogenannte Sogziffer t , durch die Optimierungsmaßnahme nicht beeinflusst wird. Diese Annahme ist beim Übergang zu unkonventionellen Propulsionskonzepten, wie sie im Rahmen dieses Vorhabens angedacht sind, jedoch nicht zulässig, so dass entsprechend neue Methoden entwickelt werden müssen.

Rein numerische Methoden sind heute mittels viskoser Rechenverfahren, sogenannter RANS-Solver, in der Lage, das Ranking von Schiffswiderständen unterschiedlicher Rumpfgeometrien mit großer Zuverlässigkeit vorherzusagen. Absolute Werte für den Schiffswiderstand oder gar für den Leistungsbedarf sind auf diese Weise aber noch nicht mit hinreichender Genauigkeit zu ermitteln.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit erfolgte entsprechend der Verteilung und Zuordnung zu den Arbeitspaketen und Unterpaketen mit den jeweiligen Projektpartnern. Darüber hinaus erfolgten – wenn erforderlich – bilaterale Zusammenarbeiten jenseits des Zuschnitts der Arbeitspakete mit den Partnern, um einen stetigen Wissenstransfer zum Erreichen der Projektziele sicherzustellen.

Eine besondere Rolle kam der HSVA dadurch zu, dass sie nicht nur die Funktion als Koordinator der nationalen Teilprojekte übernahm, sondern auch die Versuchs- und Fertigungsanlagen für die Durchführung der notwendigen Experimente zur Verfügung stellte.

2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeitspakete mit direkter Beteiligung der HSVA vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Tätigkeiten der nationalen Partner.

2.1 Arbeitspaket 1.1: Rules Analysis, Scientific Progress and Modifications

Seitens der HSVA wurden entsprechend des Arbeitsplans die einschlägigen ITTC Richtlinien zu Modellversuchen [10, 11, 12] recherchiert und mit den Vorhabenspartnern geteilt. Weiterhin wurde eine auf dem Panelverfahren basierende Software zur Berechnung von CRP Propellern reaktiviert und deren Vorhersagegenauigkeit anhand von Ergebnissen aus Modellversuchen aus dem BMBF-Bericht Nr. 1595 *Entwurf und Analyse optimaler Gegenlaufpropeller bzw. Stator/Propelleranordnungen* überprüft. Darüber hinaus wurden die Projektpartner bei der Auslegung der Propulsionsanordnung unterstützt.

2.2 Arbeitspaket 1.2: Feasibility Evaluation

Hierbei handelt es sich um abschließende Machbarkeitsanalyse des neuen Propulsionskonzeptes, die am Projektende im Ergebnis D 1.2 *Feasibility Study on Introduction of Twin-CRP-POD Solution to ULCS* dokumentiert werden soll. Hierzu wird die HSVA die während der Modellversuche (AP 3.2) ermittelten Ergebnisse beisteuern, die mittels der in AP 3.3 entwickelten Skalierungsmethoden auf die Großausführung umgerechnet wurden.

2.3 Arbeitspaket 3.2: Model Tests

2.3.1 Entwicklung und Bau einer Schubmesswaage für den HYKAT

Aufgrund der im HYKAT auftretenden großen Kräfte und niedrigen Drücke ist es nicht möglich, die konventionelle Tankmesstechnik in POD-Antrieben zu verbauen. Diese technische Beschränkung führt dazu, dass der Betriebszustand azimuthgetriebener Anordnungen, anstelle der gebräuchlichen Schubidentität, bislang über das Moment eingestellt werden muss. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein System entwickelt, welches es erlaubt, den POD-Schub am oberen Ende des Antriebes, noch vor dem Getriebe, mit Hilfe von zwei Messdosen in der POD-Aufhängung zu messen und damit die Konfiguration des Betriebspunktes über den Schub zu ermöglichen und die vollständige Propulsionscharakteristik von POD-Antrieben aufzuzeichnen.

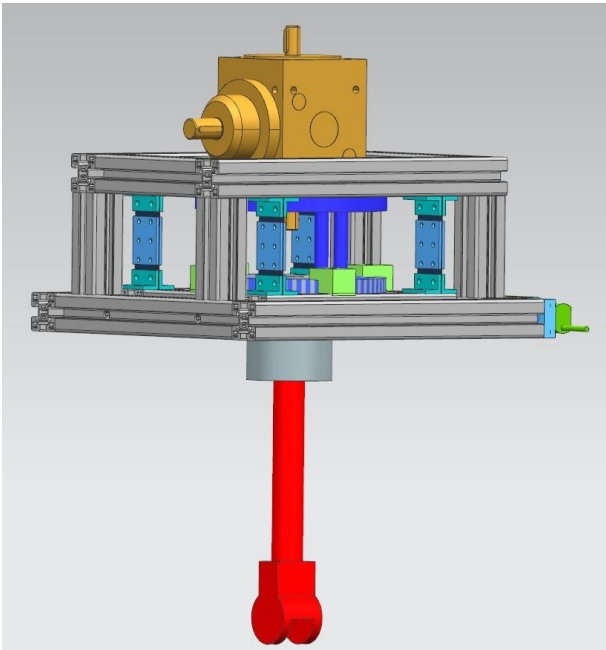


Abbildung 1: CAD-Konstruktion der HYKAT-POD-Schubmesswaage

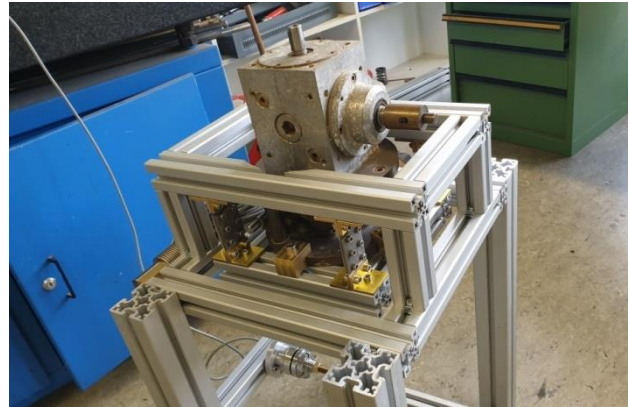


Abbildung 2: POD-Schubmesswaage nach dem Zusammenbau



Abbildung 3: POD-Schubmesswaage im eingebauten Zustand mit vorgeschalteter Drehmomentenmesseinrichtung im Modell

2.3.2 Entwurf der Drehmomentenmessung im Antriebsstrang bei Propulsionsversuchen im großen Schlepptank

Bedingt durch den großen Maßstab eines ULCS war es nicht möglich, die POD-Gehäuse mit adäquaten Messgliedern auszustatten, ohne diese in einem unrealistischen Maß aufzudicken. Aus diesem Grund wurden zwei HBM T21 Messglieder beschafft und eine spezielle Konstruktion entworfen und gebaut, mit deren Hilfe die Momentenmessglieder in den Antriebsstrang der POD-Antriebe eingebunden werden konnten, siehe Abbildungen 4 und 5 (blauer Block, Balgkupplungen, Motorerhöhung). Durch die Verschiebung der Datenaufnahme von der klassischen Position direkt hinter dem Propeller an eine andere Stelle des Propulsionsstranges müssen die dazwischenliegenden Getriebeverluste in der

Auswertung berücksichtigt werden, um das Schaftdrehmoment mit den entsprechenden Wirkungsgraden in ein Propellerdrehmoment umzuwandeln.



Abbildung 4: Aufbau der POD-Messeinrichtung für die Propulsionsversuche im großen Schlepptank



Abbildung 5: Detail der Einbindung des Drehmomentenmessgliedes in den Antriebsstrang des PODs

2.3.3 Entwurf einer Einrichtung zur Durchführung von CR-POD Freifahrten

Für die Durchführung der CR-POD Freifahrten musste ein neues „POD-Boot“ entworfen und gebaut werden, welches sich an das konventionelle Propeller-Freifahrt-Gerät H39 ankoppeln lässt. Das „POD-Boot“ dient dazu, den Einfluss der Oberfläche auf die Messergebnisse zu unterdrücken ohne das Medium dabei nennenswert durch Strömungs- oder Wellenbildung zu beeinflussen. Des Weiteren soll es die Messtechnik und Elektronik vor Wasser schützen. Dieser Schutz ist notwendig, da die Messinstrumente nur einen begrenzten Abstand zum POD haben können, um die Hebelkräfte nicht zu groß werden zu lassen.

Durch den Einsatz einer bereits im Vorlauf des Projekts entwickelten 6-Komponenten-POD-Messwaage war es sogar möglich, den Partnern Ergebnisse mit POD-Ruder Winkel und den daraus resultierenden Querkräften zu liefern, was über die ursprünglich geplanten Messdaten hinausgeht und für die Partner einen deutlichen Mehrwert darstellt. Die Ergebnisse wurden als tabellarische Werte und Grafiken über die vom Hauptkoordinator eingerichtete Arbeitsplattform zur Verfügung gestellt.

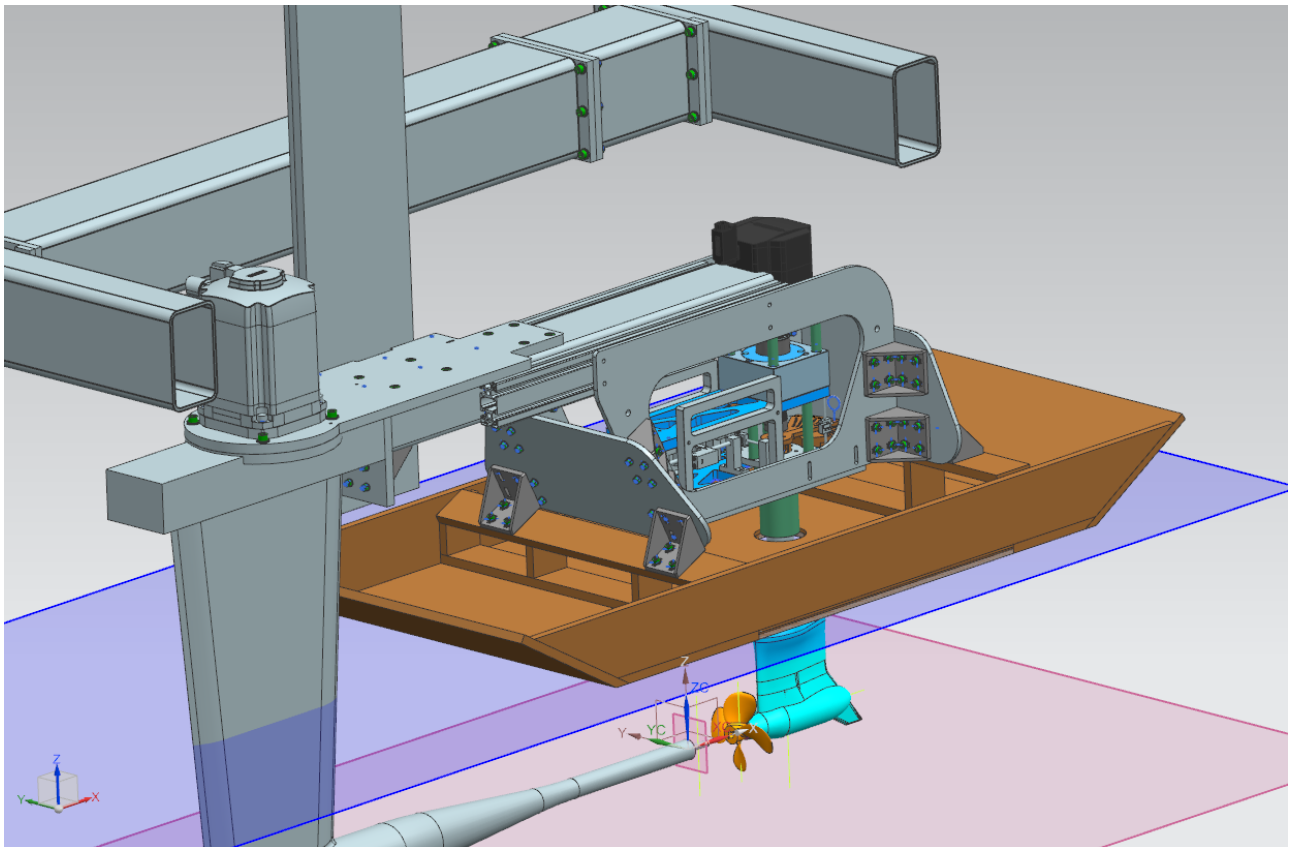


Abbildung 6: CAD-Konstruktion des POD-Boots mit Anbindung an das Propellerfreifahrtgerät H39



Abbildung 7: Versuchsaufbau der CR-POD Freifahrten unter dem Schleppwagen

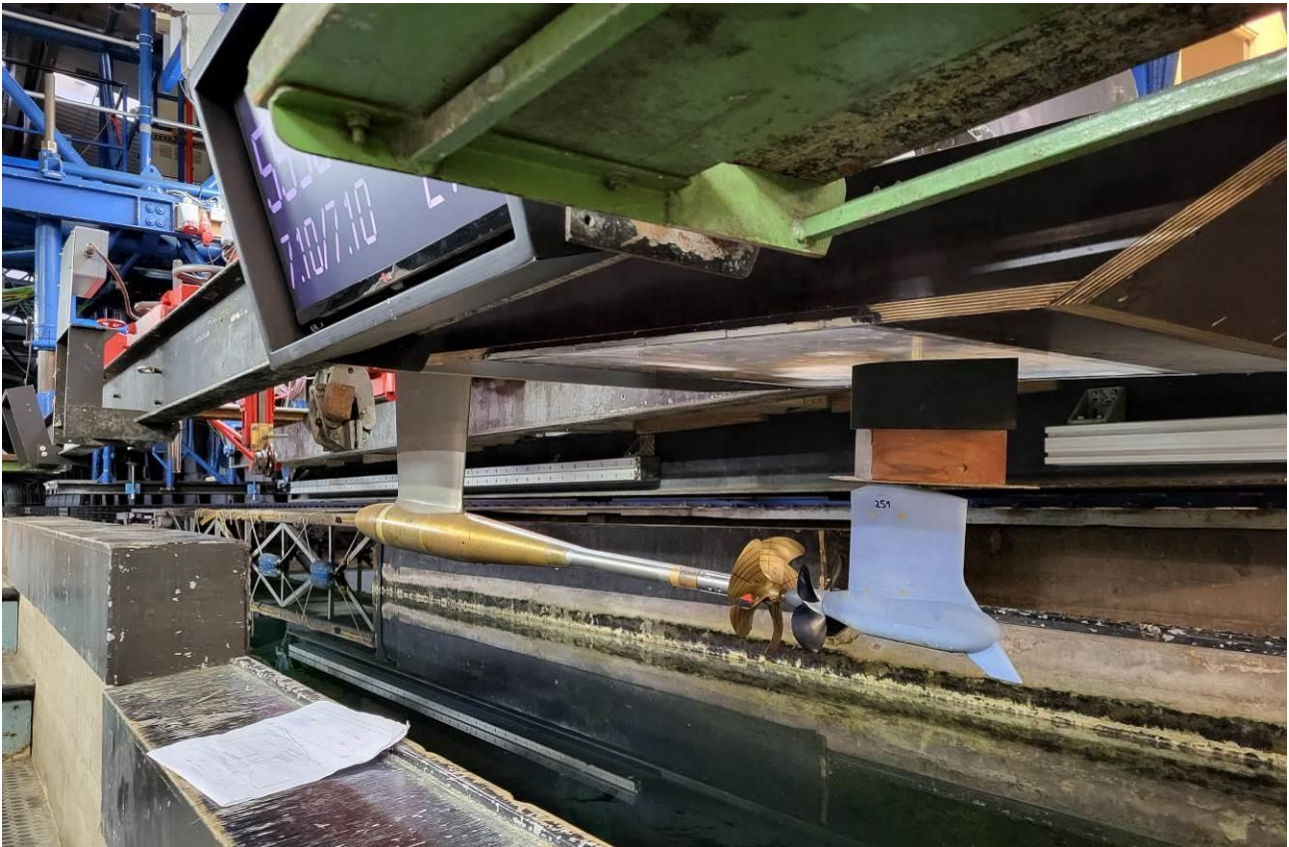


Abbildung 8: Ausrichtung des Hauptpropellers am H39 zum CR-POD Propeller kurz vor dem Absenken

2.3.4 Modellversuche

Die Modellversuche sind ein zentraler Bestandteil des Vorhabens, um die Effektivität des Konzepts nachzuweisen und den Partnern darüber hinaus wichtige Daten für die Bewältigung ihrer jeweilig nachfolgenden Aufgaben zur Verfügung zu stellen. Dementsprechend wurden nach erfolgreicher Durchführung der Modellversuche Daten für die folgenden Arbeiten an die Partner geliefert:

- Piening Propeller: Nachstrom- und Freifahrt Daten für den Propellerentwurf
- CMT: Daten zur Propulsionseffizienz für die Lifecycle Untersuchung
- GUT: HYKAT-Versuchsergebnisse für die Entwicklung der Skalierungsmethode
- SHRTC / BRABO: Input für Manövriestudie
- Seatech: Rückmeldung Effektivität der Rumpfwürfe für die Simulation

Freifahrtversuche

Die Freifahrtversuche haben an zwei Terminen, Mitte 2022 und Anfang 2023 stattgefunden. In den Kampagnen wurden die Einzelpropeller sowohl vorwärts (Standardfreifahrt), als auch rückwärts (hinter dem Freifahrtgerät, entsprechend der finalen CRP-POD-Anordnung) frei gefahren. Die Variation der Fahrtrichtung der Einzelpropeller ist notwendig, um den Einfluss des Freifahrtgerätes auf die Messungen bei Rückwärtsfahrt zu ermitteln und in den Ergebnissen der finalen CRP-POD-Anordnung zu eliminieren.

Die POD-Systeme (Gehäuse und Propeller) sowie die finale CRP-POD-Anordnung wurden ebenfalls freigefahren. Bei der vollständigen Anordnung wurde mit einem einzigen Drehzahlverhältnis gefahren und zusätzlich der POD-Anstellungswinkel in Schritten von 5° zwischen -15° und +15° variiert.

Aus den einzelnen Freifahrtmessungen wurde die Systemfreifahrt ermittelt und nach HSVA-Standard-Verfahren (Streifenmethode nach Streckwall) auf die Reynoldszahl des Propulsionsversuches so wie der Reynoldszahl in Full-Scale korrigiert und für die Auswertung der Widerstands- und Propulsionsversuche verwendet. Die für die Propulsionsauswertung relevanten Ergebnisse für die CR Freifahrt sind im HSVA-Bericht RP-2022-046 zu finden. Die Ergebnisse der Freifahrten mit angestelltem POD wurden als Wertetabellen und Diagramme (siehe Beispiele Abbildung 9 und Abbildung 10) den Partnern zur Verfügung gestellt.

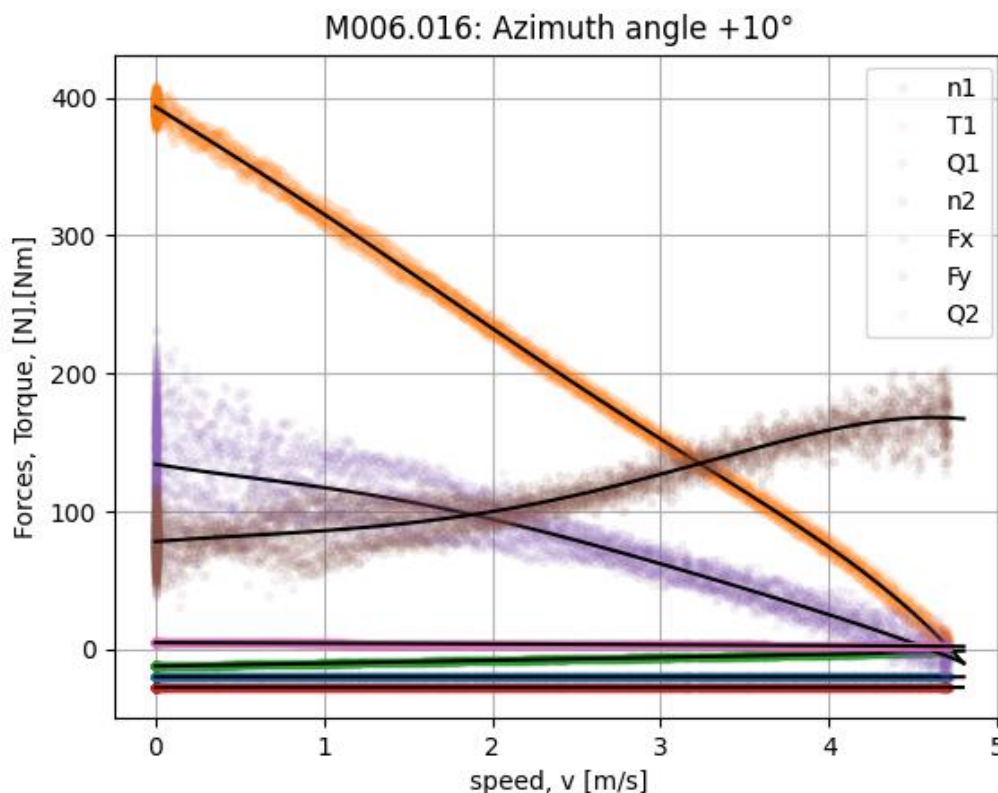


Abbildung 9: CR-POD Freifahrtmessung mit Ruderwinkel +10°

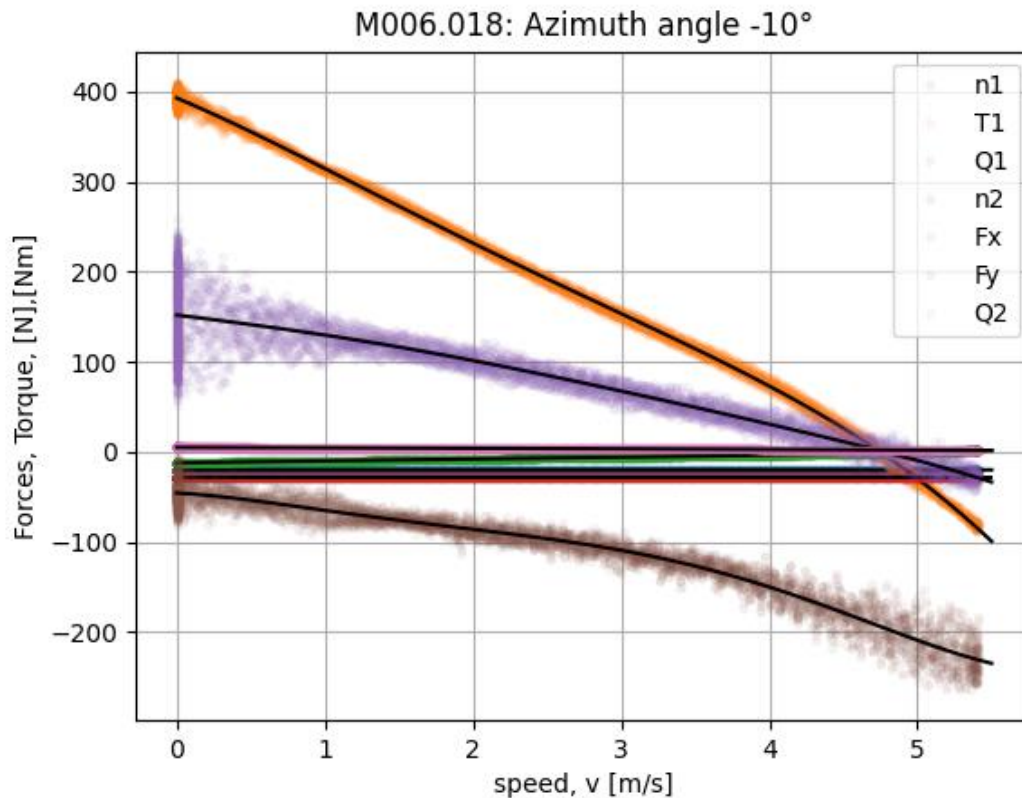


Abbildung 10: CR-POD Freifahrtmessung mit Ruderwinkel -10°

Widerstands- und Propulsionsversuche

Die Propulsionsversuche haben an insgesamt drei Terminen stattgefunden. In der ersten Serie Ende 2021 wurde als Referenz und Basis das Projekt-Containerschiff mit einer standard Einschrauberanordnung geschleppt. Der dazugehörige HSVA-Bericht trägt die Nummer RP-2021-089 und ist Teil der Ergebnisse des Arbeitspakets 3.2.

Zu den Versuchen in der Woche 16 / 2022 wurde das Hinterschiff getauscht, so dass zunächst eine etablierte Twin-Skeg Version des ULCS getestet werden konnte. An demselben Termin wurde anschließend auf die Twin-CRP-POD Anordnung umgerüstet und die Ruder gegen PODs getauscht (siehe Abbildung 12 und Abbildung 13). Für alle Varianten wurden Widerstands- und Propulsionsversuche gefahren. Die Ergebnisse sind im HSVA-Bericht RP-2022-046 dokumentiert. Zusätzlich wurde eine Nachstrommessung durchgeführt, um den Projektpartnern eine Basis für den Propellerentwurf und Informationen für die Großausführungskorrektur zu liefern. Die Ergebnisse sind im HSVA-Bericht WM-2023-004 zu finden.

Bei der Versuchsauswertung stellte sich heraus, dass die Twin-CRP-POD Variante einen weitaus höheren Leistungsbedarf aufwies, als vom Konsortium erwartet. Als bedeutender Einflussfaktor konnten die extrem großen Headboxen der POD-Antriebe identifiziert werden, die nötig schienen, um den POD-Propeller auf dieselbe Höhe mit den Schaftpropellern zu bringen. Statt in der dritten geplanten Testserie Designpropeller zu testen, wurde im Konsortium entschieden, das Hinterschiffsdesign an die Anforderungen der POD-Aufnahmen anzupassen und entsprechend zu

modifizieren (siehe Abbildung 14). Die zugehörigen Tests fanden in der Kalenderwoche 06 / 2023 statt, die Ergebnisse sind ebenfalls in dem HSVA-Bericht RP-2022-046 zu finden.

Durch die Überarbeitung des Designs des Hinterschiffs zeigte sich eine deutliche Verbesserung bezüglich des Widerstands und Propulsionsleistungsbedarfs im Vergleich zu der ursprünglichen Variante. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 11: ULCS als Einschrauber



Abbildung 12: ULCS als Zweischauber



Abbildung 13: ULCS als Twin-CRP-POD



Abbildung 14: ULCS als Twin-CRP-POD mit modifiziertem Hinterschiff und verkleinerten Headboxen

BMW; Projekttraeger Juelich (PTJ)
 twin-crp-pod ULCS
 Trial Prediction – Headwind Bft. 0
 HSVA Model 5538-10011 /-10110 /-10130 /-10250

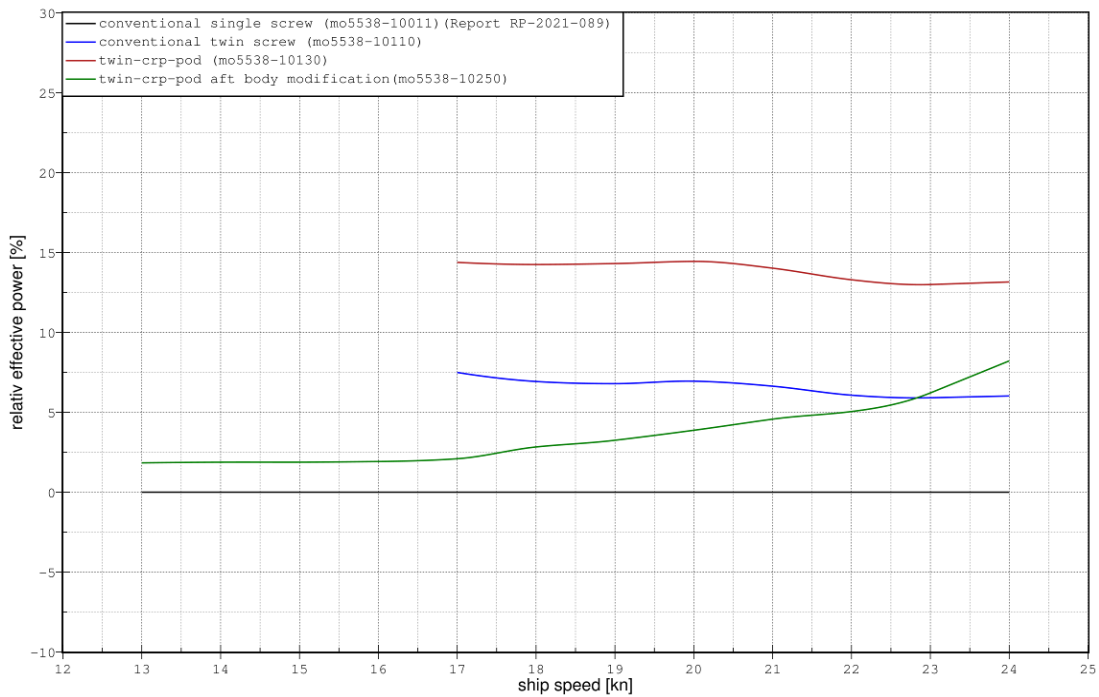


Abbildung 15: Relativer Vergleich der Widerstandsprognose der vier Modellvarianten

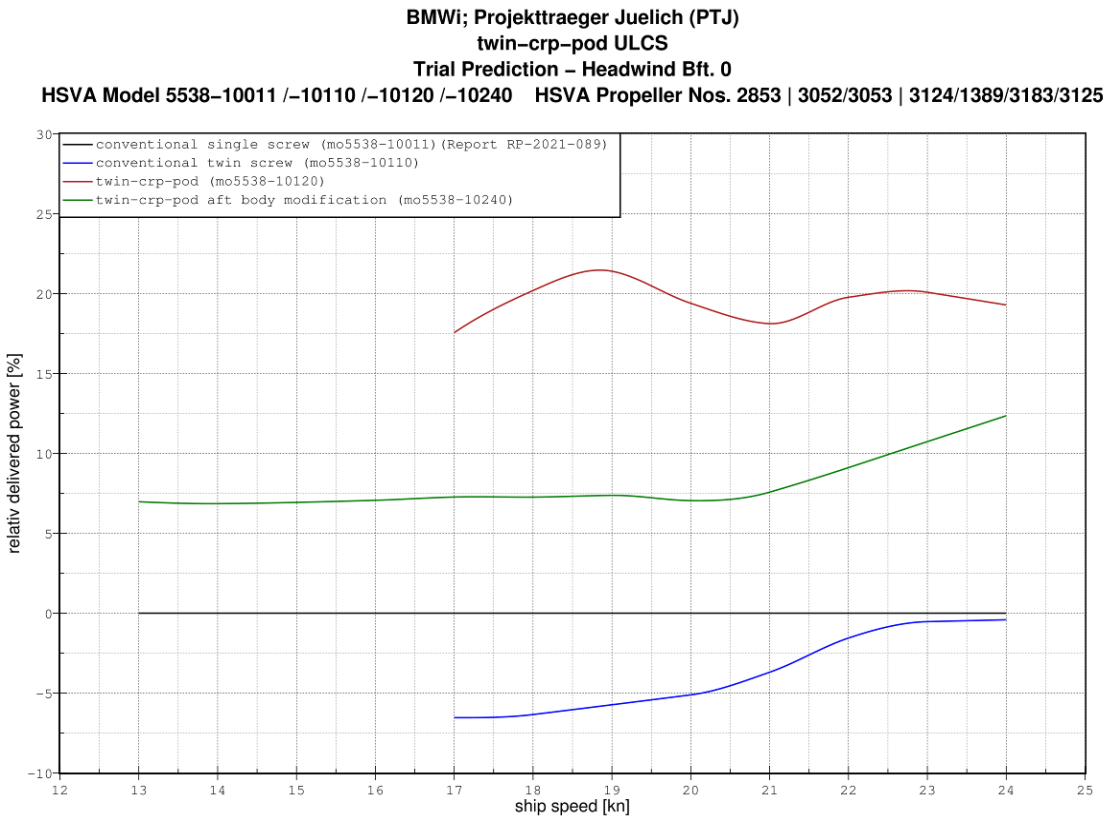


Abbildung 16: Relativer Vergleich der Propulsionsprognose der vier Modellvarianten

Kavitationsversuche im HYKAT

Im großen hydroakustischen Kavitationstunnel der HSVA (HYKAT) wurden an zwei Versuchsterminen Kavitations- und Druckschwankungsmessungen durchgeführt. In der Kalenderwoche 18 und 19 / 2022 wurden sowohl die konventionelle Zweischaubervariante als auch die Twin-CRP-POD Version mit Stockpropellern getestet. Nachdem im Konsortium die Entscheidung gegen Modellversuche mit Entwurfspropellern und stattdessen für eine Modifikation und Optimierung der Hinterschiffsanordnung getroffen wurde, fanden in der Kalenderwoche 11 / 2023 noch einmal Kavitations- und Druckschwankungsmessungen mit der neuen Hinterschiffsform in der Twin-CRP-POD-Anordnung statt. Obwohl die Entscheidung für die Neugestaltung des Hinterschiffs sowohl vor dem Hintergrund der ersten Versuchsergebnisse als auch in Hinblick auf die nach der Modifikation erzielten Verbesserungen als richtig einzustufen ist, sind die vergleichenden Propulsionsversuche ohne die finalen Entwurfspropeller nur wenig aussagekräftig. Die Ergebnisse der Versuche im HYKAT wurden dennoch im Bericht CAV-2023-011 zusammengefasst. Zusammen mit den Berichten der Versuche aus dem großen Schlepptank bilden sie das Ergebnis des Arbeitspaketes 3.2 *Report on Hydrodynamic Tests*.

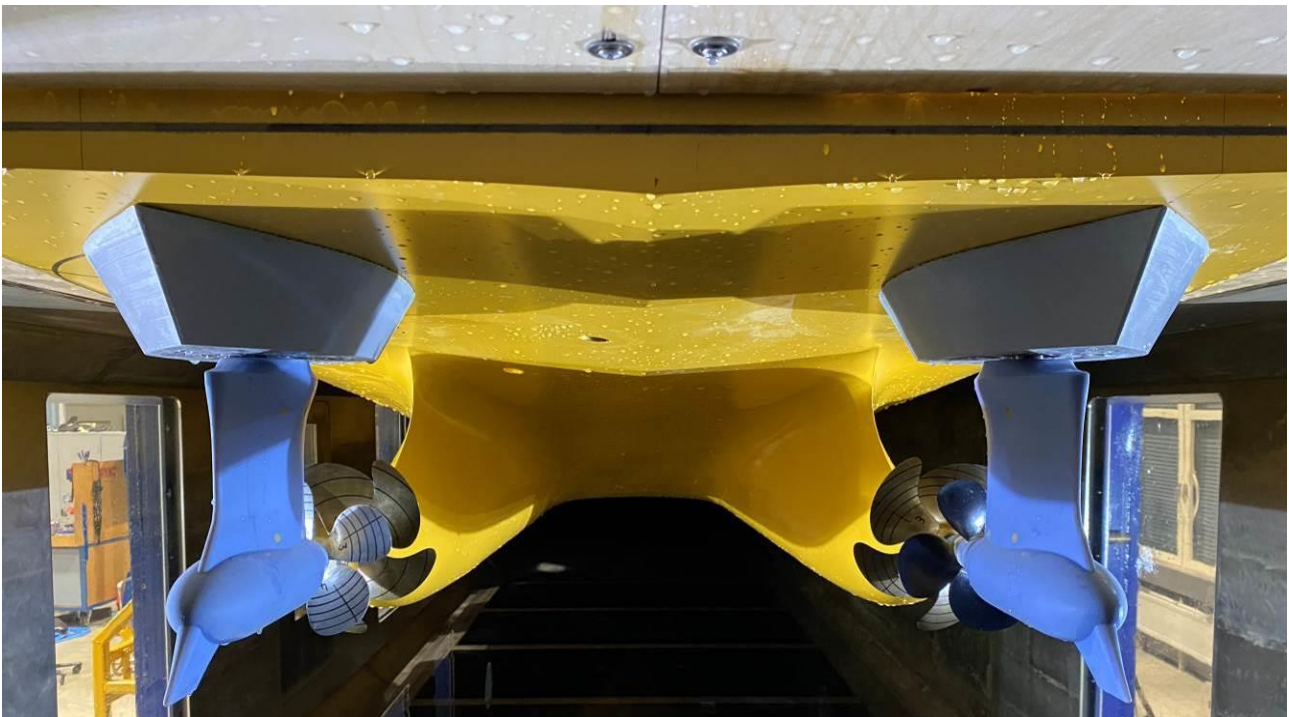


Abbildung 17: Installation des initialen Hinterschiffes im HYKAT



Abbildung 18: Installation des optimierten Hinterschiffes im HYKAT

Ergebnisse der Druckschwankungsmessungen

Die Druckimpulsmessungen wurden bei der korrekten Kavitationszahl σ_n sowohl für den Hauptpropeller als auch für den POD-Propeller durchgeführt. Für den Hauptpropellerzustand wurden 0,43 kPa für die erste Harmonische und 0,16 kPa für die zweite Harmonische gemessen. Für den Zustand des POD-Propellers wurden 0,29 kPa für die erste Harmonische und 0,16 kPa für die zweite

Harmonische gemessen. Diese Werte sind für ein Schiff dieser Art sehr niedrig, was dem erwarteten Vorteil dieser innovativen Anordnung entspricht.

Ergebnisse der Kavitationsbeobachtungen

Die Kavitationsbeobachtungen wurden für eine für diesen Schiffstypen typische Geschwindigkeit von 21 Knoten durchgeführt. Dies wurde bei der entsprechenden Kavitationszahl σ_n sowohl für den Hauptpropeller als auch für den POD-Propeller separat durchgeführt. Es wurde keine Spitzenwirbel-, Blatt-, Wolken-, Wurzel-, Blasen- oder Nabenwirbelkavitation beobachtet. Ebenso wurde unter den untersuchten Bedingungen auch keine Flächenkavitation beobachtet.

2.4 Arbeitspaket 3.3: Extrapolationsmethode

Die Extrapolation von Modellversuchsergebnissen auf die Großausführung ist grundsätzlich nicht trivial. Die unkonventionelle CRP-POD-Anordnung sorgt mit ihren unterschiedlich angeströmten Komponenten – Teile des Podgehäuses befinden sich im Propellernachstrom, andere Teile in der freien Zuströmung – für weitere Komplexität. Die Propulsionsprognose erfolgt – wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben – nach HSVA Standardauswertung. Das POD-Gehäuse ist nach dieser Definition Teil des Propulsionsorgans und in der Freifahrt bereits berücksichtigt.

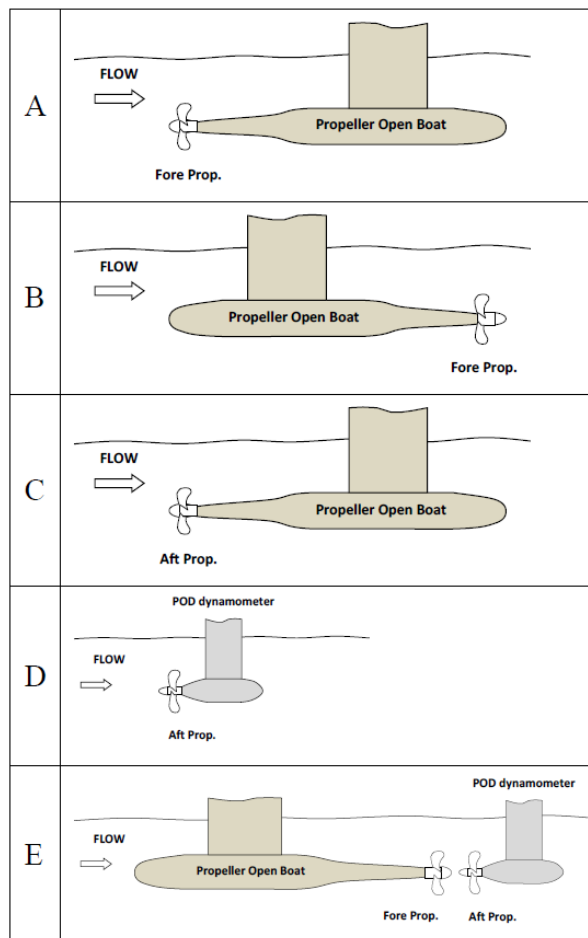


Abbildung 19: Freifahrtkonfigurationen nach ITTC [11]

Die Freifahrt setzt sich demnach mindestens aus den Konfigurationen A, B, D und E in Abbildung 19 zusammen. Die klassische Freifahrt des Propellers A und die Freifahrt des Propellers hinter dem Freifahrtgerät B werden benötigt, um den Einfluss des Freifahrtgerätes auf die Messung in Konfiguration E zu eliminieren. Die Freifahrtkonfiguration D wird zur Skalierung des POD-Widerstandes herangezogen.

Die Ergebnisse der Propulsionsprognose wurden den Partnern zur Verfügung gestellt, die mit Hilfe numerischer Berechnungen vergleichende Propulsionszustände auf unterschiedlichen Maßstäben (inklusive Full-Scale) berechnet und analysiert haben.

2.5 Zusammenfassung der Arbeiten der nationalen Partner

2.5.1 CMT

Im Rahmen des Twin-CRP-POD ULCS Projekts hat die CMT gGmbH die Konzeption der Produktionsprozesse inklusive einer Materialflusssimulation und eines Life Cycle Process Assessment (LCPA) übernommen.

Während des Arbeitspaketes AP 1 *Gesamtbewertung der neuartigen Twin-CRP-POD-Lösung* sammelte CMT Vorschriften, Richtlinien und Veröffentlichungen von internationalen und nationalen Institutionen und anderen Projekten, um das Know-how und die Auswirkungen der Modifikation des Antriebssystems zu analysieren und Anforderungen abzuleiten. Die Sammlung konzentrierte sich nicht nur auf die Vorschriften für die Auslegung der Anlage und des Maschinenraums, sondern auch auf das Installationsverfahren und die ökonomische und ökologische Bewertung (siehe D1.1 *Bericht über Anforderungsdefinitionen und Änderungsvorschläge* und D1.2 *Machbarkeitsstudie über die Einführung der Twin-CRP-POD-Lösung bei ULCS*).

Im Arbeitspaket AP 2 *Neubau und Nachrüstung* half CMT zusammen mit den Partnern bei der Definition der technischen Spezifikationen des Neubauprojekts. CMT überprüfte die Spezifikation der neuen Maschinen, die einen Dual-Fuel-Hauptmotor, einen Wellengenerator und ein Batteriesystem zur Versorgung des dualen CRP-POD-Systems umfassen. Darüber hinaus überprüfte CMT den Bauplan für den Maschinenraum und den hinteren Teil des Schiffes, um die POD-Konstruktion unterzubringen. Nach Durchsicht der Ausrüstungsliste erstellte CMT einen Plan für das Blocklayout (Zerlegung des Schiffes in schiffbauspezifische Montageeinheiten), der für den Montageprozess des Schiffes geeignet ist (siehe D2.3 und D2.4).

Ein Simulationsmodell für den Neubau von Twin-CRP-POD ULCS sowie das Referenzschiff *Marco Polo* sowie ein zusätzliches Modell für die Nachrüstung von Komponenten wurden mit Hilfe von Plant Simulation von Siemens unter Verwendung des schiffbauspezifischen Toolsets *Simulation Toolkit for Shipbuilding* von SimPlan erstellt. Ziel der Simulation war es, die optimale Baustrategie für eine Werft zu ermitteln, um die Produktionskosten zu minimieren, die Durchlaufzeit im Schiffbau zu reduzieren und die Prozesseffizienz für den Neubau und die Nachrüstung von Twin-CRP-PODs bei ultragroßen Containerschiffen zu erhöhen. Entsprechend wurden der Ressourcenaufwand (Arbeitskräfte in Stunden), die Kosten für die Montageprozesse und die Prozesszeit des Schiffbauprozesses einschließlich der Modulmontage und der Montage der Maschinenraumausrüstung ermittelt. Es wurden Montageprozesse definiert und die Abläufe der Prozesse festgelegt. Die Prozesszeiten und die Anzahl der Mitarbeiter werden auf der Grundlage der Angaben von Experten aus Werften und Ingenieurbüros geschätzt.

Auf der Grundlage der Anforderungen an die Prozesse wurde ein grundlegendes Werfts simulationsmodell konzipiert. Simulationsläufe wurden für den Neubau eines Twin-CRP-POD ULCS (Ultra Large Container Ship) sowie für das Referenzschiff *Marco Polo* und für die Umrüstung eines Doppelruder-ULCS auf Twin-CRP-POD durchgeführt. Als Ergebnis des Simulationslaufs wurden Gantt-Diagramme erstellt, in denen die Dauer des Montageprozesses der Maschinenraumausrüstung und der einzelnen Module dargestellt ist. Die Auslastung der einzelnen Arbeiter mit den jeweiligen Qualifikationen sowie weiterer Ressourcen wurde mit Hilfe von weiteren statistischen Auswertungen ermittelt und in grafischer Form dargestellt. Die Ergebnisse sind in den Berichten D2.3 *Bericht über die technischen Herausforderungen des Neubaus von Doppel-CRP-Schiffen* und D2.4 *Bericht über die technischen Herausforderungen der Nachrüstung von Twin-CRP-POD Schiffen* zu finden.

Es wurde deutlich, dass mit Hilfe einer Simulation die Prozesse und Ressourcen besser geplant werden können. Das Ergebnis ist eine Minimierung der Produktionskosten und eine Verkürzung der Durchlaufzeit für den Schiffbau. Auch die Produktionsprozesse können durch die Simulation, insbesondere die 3D-Visualisierung, besser verstanden werden. Die Ergebnisse der Simulationsläufe einschließlich der Gesamtprozesszeiten wurden als Input für die LCPA-Studien geliefert.

Im Rahmen des Arbeitspaketes AP 5 *Life Cycle Performance Analyses (LCPA)* wurden u.a. die Simulationsergebnisse zu Prozesszeiten und Auslastung als Input für Life Cycle Cost (LCC)-Analysen und Life Cycle Assessment (LCA) verwendet und für die folgenden Testfälle angewendet:

- Neubau von Schiffen: konventionelle ULCS (ein Propeller), Twin-CRP-POD mit konventionellem Kraftstoffsystem und Twin-CRP-POD mit LNG-betriebem Hauptantrieb;
- Nachrüstung von Schiffen: konventionelle Twin ULCS (zwei Propeller), Twin-CRP-POD mit konventionellem Kraftstoffsystem und Twin-CRP-POD mit LNG-betriebem Hauptantrieb (die LNG-betriebene Variante wurde in Betracht gezogen, nachdem die endgültigen Testergebnisse für den Antrieb vorlagen).

Die Ergebnisse zeigen, dass für die mit LNG betriebenen Varianten ein Kostenvorteil über den Lebenszyklus erzielt werden kann, der mit einer größeren Preisdifferenz zwischen konventionellen Kraftstoffen und LNG zunimmt, wenn – aufgrund der besseren Verfügbarkeit von LNG – die Preise weiter fallen werden. Verschiedene Szenarien für steigende externe Kosten und eine Verbesserung der wirtschaftlichen Lage zeigen auch weitere Vorteile in Form höherer Kapitalwerte und einer früheren Investitionsrendite für die mit LNG betriebenen Varianten. Weitere Informationen hierzu sind in den Dokumenten D5.1 *Bericht über die LCPA-Methodik und -Kennzahlen*, D5.2 *Bericht über die LCPA-Neubauten* und D5.3 *Bericht über die LCPA-Nachrüstungen* hinterlegt.

2.5.2 Piening Propeller:

Im Rahmen des Forschungsprojekts MarTERA Twin-CRP-POD ULCS hat Piening Propeller die Antriebskonfiguration einer Twin-Propeller-Anordnung mit kontrarotierenden PODs in Hinblick auf Regularien und Klassifikation, State of the Art und technische Aspekte untersucht. Das Projekt umfasste ebenso den Entwurf und das Design der Propeller mithilfe hydrodynamischer Berechnungen sowohl für die Twin-Propeller als auch für die CRP-PODs.

Diesbezüglich wurden drei Propeller designt, zwei für die CRP-POD- und eine für die Twin-Propeller-Konfiguration. Die technischen Daten und Informationen bezüglich der Wirtschaftlichkeit wurden den Projektpartnern weitergegeben.

Grundlage der Berechnungen waren Modellversuche der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt, HSVA. Mithilfe der dort gewonnenen Daten für den Schiffswiderstand, den Nachstrom und die Propulsion konnte die Antriebskonfiguration designt werden. Die Designgeschwindigkeit betrug 21 Knoten und das entsprechende Nachstromfeld wurde mit der gemittelten Nachstromziffer aus Modell- und Großausführungsberechnungen auf die Großausführung übertragen. Das berechnete Nachstromfeld diente zur Untersuchung der Kavitationsgefahr und zur entsprechenden Optimierung der Propellergeometrien. Die Untersuchungen wurden auf Grundlage von Wirbelgittermethoden (Vortex Lattice Method) und darüber hinaus mithilfe Finiter-Volumen-Methoden und RANS-Lösern durchgeführt.

Die numerischen Simulationen wurden sowohl unter Freifahrtbedingungen als auch im Nachstromfeld des Schiffes umgesetzt. Die Freifahrtkurven beider CRP-PODs wurden für Fortschrittsgrade im Bereich des Designpunkts berechnet. Die numerischen Berechnungen für die CRP-POD Konfigurationen wurden mithilfe der Modellversuche korrigiert.

2.6 Zusammenfassung der Arbeiten der internationalen Partner

Die Zusammenarbeit mit den internationalen Partnern war stets sehr gut und kooperativ. Auf einigen Versammlungen an den Standorten der Partner wurden die Beziehungen weiter vertieft und es fand ein intensiver Austausch statt. Über die vom Hauptprojektkoordinator bereitgestellte Arbeitsplattform wurden durchgängig Ergebnisse ausgetauscht und diskutiert.

Als Ergebnis D3.3 zur Extrapolationsmethode gilt einerseits die Präsentation auf der Konferenz *Hiper 2024* mit dem Titel *Evaluation of the Twin-CRP-POD Propulsion Concept for Ultra-Large Container Ship – Conclusion From the Project Study* und vor allem die Veröffentlichung eines Papers bei *Ocean Engineering* mit dem Titel *Towards a reliable method for extrapolation of propulsion performance for vessels with Twin-CRP-POD system*.

2.7 Zahlenmäßiger Nachweis

In Bezug auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Verwendungsnachweises sind an erster Stelle die Personalkosten der HSVA zu nennen, welche mit insgesamt 291.786,05 € zu Buche schlagen. Neben den Kosten für wissenschaftliches Personal fielen vor Allem Kosten für die Modellfertigung, die Durchführung der Versuche sowie für Entwicklung und Bau der Messtechnik an.

Darüber hinaus sind Materialkosten für die Erstellung des Schiffsmodells (Holz, Kunststoffe) in Höhe von 19.961,89 € zu nennen.

Die Mittel wurden gemäß der Planung eingesetzt, wobei im Bereich der Personalkosten Überschreitungen in Höhe von knapp 90.000 € zu verzeichnen waren, welche hauptsächlich in ungeplanten Mehraufwendungen im Modellbau und der Versuchsdurchführung begründet sind, welche zu Beginn des Vorhabens noch nicht absehbar waren.

2.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das ERA-Net-Cofund Programm *MarTERA - Maritime and Marine Technologies for a new ERA* zielt explizit auf die Stärkung der Innovations- und Leistungsfähigkeit der Europäischen maritimen Industrie sowie die Stärkung der *European Research Area (ERA)* im Bereich maritimer Technologien ab. In der Darstellung der auf nationaler Seite zugrundeliegenden *Richtlinie zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in der maritimen Wirtschaft* heißt es dabei „Investitionen in den Klimaschutz sowie den Umwelt- und Naturschutz sind zugleich eine Chance und Notwendigkeit, um mit innovativen Produkten, Verfahren und Geschäftsideen international wettbewerbsfähig zu bleiben. Gleichzeitig kann die maritime Wirtschaft durch innovative und nachhaltige Technologien wichtige Beiträge zum Gelingen der Energiewende und zur nachhaltigen Nutzung maritimer Ressourcen sowie zur Mitgestaltung höchster Umweltstandards leisten“ [9].

Das Vorhaben Twin-CRP-POD ULCS adressiert genau diese strategischen Ziele, indem es nicht nur einen wichtigen Beitrag zur Deutsch-Europäischen Technologieführerschaft in Sachen Innovative Antriebskonzepte leistet, sondern durch die Verbindung führender Experten auf dem Gebiet der Hydrodynamik in Deutschland, Polen und Belgien auch zur Sicherung und Stärkung der gesamteuropäischen Innovationskraft des maritimen Sektors beiträgt.

Das Erreichen der Vorhabensziele konnte nur im Verbund mit den nationalen und Europäischen Partnern gelingen, da diese die gesamte Breite der benötigten Expertise – Modellversuche, Großausführungssimulationen, Messtechnik, Propellerdesign und -fertigung, Schiffsdesign und -betrieb – abdecken. In Bezug auf die Modellversuche in Arbeitspaket 3 besitzt nur die HSVA mit ihrem umfangreichen Know-how im Bereich strömungsmechanischer Versuche und deren Übertragung in die Großausführung sowie den dafür notwendigen Versuchsanlagen und Fertigungskapazitäten die Möglichkeit, diese Arbeiten anzubieten und durchzuführen.

2.9 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der voraussichtliche Nutzen und die Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse sind für die HSVA hoch, da Erkenntnisse aus dem Projekt auf vielerlei Weise in der täglichen Arbeit überführt werden können. Zum einen konnte auf dem Gebiet der Entwicklung und des Baus von Messtechnik wertvolles Know-how erworben werden. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund einer potentiellen Diversifizierung

der HSVA-Dienstleistungen von hoher Bedeutung, da mit einer Erweiterung des Portfolios hin zu einem Anbieter von Messtechnik Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz der HSVA mittelfristig spürbar gesteigert werden können. Darüber hinaus erweitert die neu entwickelte Messtechnik das Angebot der HSVA an durchführbaren Versuchen. In Kombination mit den im Zuge des Vorhabens hinzugewonnenen Kompetenzen in der Durchführung von Versuchen mit neuartigen, innovativen Propulsionskonzepten kann die HSVA, die sich schon seit Langem auf die Durchführung hochkomplexer Sonderversuche spezialisiert hat, ihre führende Position auf diesem Feld im internationalen Wettbewerb weiter ausbauen.

Da die Ergebnisse des Vorhabens teilweise unmittelbar zu neuen und / oder der Verbesserung bereits bestehender Dienstleistungen geführt haben, wurden und werden diese auch nach Abschluss der Arbeiten weiter erfolgreich genutzt. Es ist zu erwarten, dass sowohl die theoretischen Erkenntnisse als auch die entwickelte Hardware auch in den kommenden Jahren einen spürbaren Mehrwert für die HSVA darstellen und regelmäßig auch in kommerziellen Projekten zum Einsatz kommen werden.

2.10 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Rahmen der Projektlaufzeit sind dem Konsortium keine Fortschritte von anderen Partnern bekannt geworden, die einen Einfluss auf die Ergebnisse des Vorhabens Twin-CRP-POD ULCS gehabt hätten.

2.11 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Zuge des Verbundvorhabens wurden Teile der Ergebnisse im Rahmen von Fachkonferenzen wie etwa der *Ship Efficiency 2023* vorgestellt [8]. Schriftliche Veröffentlichungen erfolgten in der Fachzeitschrift *Ocean Engineering* [7] sowie im Rahmen der *HiPER 2024* [6].

Darüber hinaus wurden einzelne Ergebnisse des Vorhabens, wie etwa Details der neu entwickelten Messtechnik, gegenüber ausgewählten Kunden vorgestellt und beworben. Auch in der HSVA-eigenen *NewsWave* wurden entsprechende Artikel veröffentlicht [5].

Die detaillierten Ergebnisse der durchgeführten Modellversuche sind in den entsprechenden HSVA-Berichten dokumentiert [1,2,3,4].

Aktuell sind keine weiteren dezidierten Veröffentlichungen zum Vorhaben geplant, wobei einzelne Erkenntnisse des Projekts in anderweitige Publikation einfließen dürften.

3 Quellenverzeichnis

- [1] **HSVA** –Widerstands- und Propulsionsbericht 635041-RP-2021-089. Hamburg, 2021.
- [2] **HSVA** –Widerstands- und Propulsionsbericht 635041-RP-2022-046. Hamburg, 2022.
- [3] **HSVA** –Kavitationsbericht 635041-CAV-2023-011. Hamburg, 2023.
- [4] **HSVA** –Nachstrombericht 635041-WM-2023-004. Hamburg, 2023.
- [5] **HSVA** –NewsWave 1-2022. Hamburg, 2022.
- [6] **Brüns, S.** – Evaluation of the Twin-CRP-POD Propulsion Concept for Ultra-Large Container Ship – Conclusion From the Project Study. 16th Symposium on High-Performance Marine Vehicles (HiPER 2024), Drübeck 2024.
- [7] **Pruszek, H.; Reichel, M.; Necel, M.; Brüns, S.** – Towards a Reliable Method for Extrapolation of Propulsion Performance for Vessels with Twin-Crp-POD System. Ocean Engineering, 2024.
- [8] **Brüns, S.; Lassen, J.; Lemarechal, J.; Strobel, H.** – Boosting Ship Efficiency: Current Available and Future Technologies for Newbuildings and Retrofits. Ship Efficiency, Hamburg, 2023.
- [9] **BMWK** – Richtlinie zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation in der maritimen Wirtschaft. BAnz AT 24.07.2024 B2, Berlin, 2024.
- [10] **ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-01.3**, Podded Propulsor Tests and Extrapolation (2021)
- [11] **ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-01.6**, Hybrid Contra-Rotating Shaft Pod Propulsors Model Test (2017)
- [12] **ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-03.6**, Podded Propulsor Model Scale Cavitation Test (2011)

4 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: CAD-KONSTRUKTION DER HYKAT-POD-SCHUBMESSWAAGE	15
ABBILDUNG 2: POD-SCHUBMESSWAAGE NACH DEM ZUSAMMENBAU.....	15
ABBILDUNG 3: POD-SCHUBMESSWAAGE IM EINGEBAUTEN ZUSTAND MIT VORGESCHALTETER DREHMOMENTENMESSEINRICHTUNG IM MODELL	15
ABBILDUNG 4: AUFBAU DER POD-MESSEINRICHTUNG FÜR DIE PROPULSIONSVERSUCHE IM GROßEN SCHLEPPTANK	16
ABBILDUNG 5: DETAIL DER EINBINDUNG DES DREHMOMENTENMESSGLIEDES IN DEN ANTRIEBSSTRANG DES PODS	17
ABBILDUNG 6: CAD-KONSTRUKTION DES POD-BOOTS MIT ANBINDUNG AN DAS PROPELLERFREIFAHRTGERÄT H39	18
ABBILDUNG 7: VERSUCHSAUFBAU DER CR-POD FREIFAHRTEN UNTER DEM SCHLEPPWAGEN.....	18
ABBILDUNG 8: AUSRICHTUNG DES HAUPTPROPELLERS AM H39 ZUM CR-POD PROPELLER KURZ VOR DEM ABSSENKEN .	19
ABBILDUNG 9: CR-POD FREIFAHRTMESSUNG MIT RUDERWINKEL +10°	20
ABBILDUNG 10: CR-POD FREIFAHRTMESSUNG MIT RUDERWINKEL -10°	21
ABBILDUNG 11: ULCS ALS EINSCHRAUBER	22
ABBILDUNG 12: ULCS ALS ZWEISCHRAUBER.....	23
ABBILDUNG 13: ULCS ALS TWIN-CRP-POD.....	23
ABBILDUNG 14: ULCS ALS TWIN-CRP-POD MIT MODIFIZIERTEM HINTERSCHIFF UND VERKLEINERTEN HEADBOXEN....	24
ABBILDUNG 15: RELATIVER VERGLEICH DER WIDERSTANDSPROGNOSE DER VIER MODELLVARIANTEN.....	24
ABBILDUNG 16:RELATIVER VERGLEICH DER PROPULSIONSPROGNOSE DER VIER MODELLVARIANTEN	25
ABBILDUNG 17: INSTALLATION DES INITIALEN HINTERSCHIFFES IM HYKAT	26
ABBILDUNG 18: INSTALLATION DES OPTIMIERTEN HINTERSCHIFFES IM HYKAT	26
ABBILDUNG 19: FREIFAHRTKONFIGURATIONEN NACH ITTC [11]	27