FRIENDSHIP SYSTEMS

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger:	FRIENDSHIP SYSTEMS AG Benzstr. 2 14482 Potsdam
Förderkennzeichen:	**03SX528D**
Vorhaben:	Verbundprojekt **MariData** – Umfassende Technologien für das Energiemanagement von Schiffen Teilvorhaben **GeometricTwins** – Erzeugung digitaler Zwillinge der Schiffsgeometrie für die Nutzung im Schiffsbetrieb
Laufzeit des Vorhabens:	01.12.2020 bis 31.05.2024
Berichtszeitraum:	01.12.2020 bis 31.05.2024

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung des Gesamtprojekts *MariData* 5
1. Aufgabenstellung 5
2. Voraussetzungen des Vorhabens 5
3. Planung und Ablauf 6
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn 8
5. Zusammenarbeit 9
II. Eingehende Darstellung des Teilprojekts *GeometricTwins* 9
1. Erzielte Ergebnisse 10
AP1: Projektanforderungen und Spezifikationen 10
AP2: Referenzschiffe und zugehörige Datenerfassung 13
AP3: Analyse von Treibstoffverbräuchen und Zuordnung von Ursachen 34
AP6: Anwendungen und Validierungen 35
2. Verwendung der Zuwendung und wichtigste Kostenpositionen 39
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten 40
4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 40
5. Wissenschaftlicher und technischer Fortschritt bei anderen Stellen 41
6. Veröffentlichungen 41
III. Erfolgskontrolle und wissenschaftliche Bedeutung 41
1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen 41
2. Wissenschaftliche und technische Ergebnisse und Erfahrungen 42
3. Verwertungsplan 42
Erfindungen, Schutzrechte, Lizenzen 42
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten 42
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben 42
5. Präsentationsmöglichkeiten 43
6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung 43

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: MariData DSS 10

Bild 2: Ship Dynamics Model für unterschiedliche Betriebssituationen 12

Bild 3: Einteilung der Level der Nachmodellierung innerhalb eines Spektrums von vorliegenden Inputs und erreichten hydrodynamischen Genauigkeiten 14

Bild 4: Parametermodell für Tanker 15

Bild 5: Globaler Vergleich von tatsächlicher Geometrie (grün) und auf Level 1 vollparametrisch erzeugter Geometrie (blau) für den CBT 16

Bild 6: Lokaler Vergleich von tatsächlicher Geometrie (grün) und auf Level 1 vollparametrisch erzeugter Geometrie (grau) für den CBT 16

Bild 7: Inputs für die Geometrieerzeugung innerhalb CAESES® 17

Bild 8: Parametermodell in CAESES - hier: ausgefüllt für Level 1 am Beispiel des Heavy Lift Carriers 18

Bild 9: Vollparametrisches Rudermodell, hier mit Costa Bulb 18

Bild 10: Parametrisches Rudermodell in CAESES 19

Bild 11: Originalgeometrie vs. Nachmodellierung mittels eines vollparametrischen Modells 19

Bild 12: Vergleich ausgewählter Werte der Hydrostatik für verschiedene Levels der Nachmodellierung (hier dimensionslose Längsposition des Schwerpunkts der Verdrängung über dimensionslosem Tiefgang) 20

Bild 13: Vergleich ausgewählter Werte der Hydrodynamik für verschiedene Levels der Nachmodellierung 21

Bild 14: Zusatzwiderstände im Seegang für den Carl Büttner Tanker 22

Bild 15: Gitter im Hinterschiffsbereich und auf dem Ruder für den CBT 23

Bild 16: Asymmetisches Nachstromfeld des CBT (stationäre Geradeausfahrt) 24

Bild 17: Druckverteilung auf dem Rumpf des CBT (stationäre Geradeausfahrt) 24

Bild 18: Ausgewählte Spanten, DWL und SAC 25

Bild 19: Level 1 Modell des SAL Heavy Lift Carriers 26

Bild 20: Originalgeometrie (rot) vs. Geometrie des Level 1 Modells (schwarz) für den SAL Heavy Lift Carriers 27

Bild 21: Startbildschirm der WebApp zur schnellen Rumpfmodellierung 27

Bild 22: Eingabemaske für Level 1 Geometrie 28

Bild 23: Maske für den möglichen Download des Level 1-Rumpfs im STL-Format 28

Bild 24: Feature zur schnellen Modellierung eines Bugwulsts (und etwaiger Anpassungen) 29

Bild 25: Ausschnitt der Feature Definition – abgebildet: CurveEngine und MetaSurface 29

Bild 26: Designkurven für die Oberfläche einer Gondelseite 30

Bild 27: MetaSurface einer Twinskeg-Gondel 30

Bild 28: Variation des Verdrehungswinkels um die Antriebsachse 31

Bild 29: Illustration eines Ersatzmodells (graue Fläche), das mittels der Daten aus einer systematischen Versuchsmatrix (blaue Punkte) erzeugt wurde 32

Bild 30: Verteilung von Sampling-Punkten des Sobol-Algorithmus 33

Bild 31: Vergleich von Ersatzmodellen auf Basis unterschiedlicher Eingabedaten (blau: systematische Versuchsmatrix, grau: quasi-random Sobol Sequenz) 33

Bild 32: Vergleich von historischen Betriebsdaten und Vorhersagen 36

Bild 33: Vergleich des Leistungsbedarf bei variierten Widerstandskomponenten 37

Bild 34: Vergleich der historischen und optimierten Route 38

Bild 35: Optimierte Routen für +-20% Zusatzwiderstand durch Wind 39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete, Partner und Beteiligung von FRIENDSHIP SYSTEMS 7

Tabelle 2: Level des Parametermodells - Genauigkeiten der Geometrie 14

Tabelle 3: Vergleich Hydrostatik Level 1 Modell und Originalgeometrie des SAL Heavy Lift Carriers 26

I. Kurze Darstellung des Gesamtprojekts *MariData*

1. Aufgabenstellung

Das Hauptziel des Gesamtprojekts *MariData* besteht in der Entwicklung umfassender Technologien für das Energiemanagement von Schiffen, um deren Betrieb effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten. Wesentliche Bestandteile des Projekts sind die Überwachung und Optimierung des Schiffsbetriebs durch ein Decision Support System (DSS), das sowohl Besatzungen als auch Reedereien unterstützt, Entscheidungen auf Basis von Echtzeitdaten zu treffen. Die zentralen Faktoren zur Optimierung sind die Reduzierung des Treibstoffverbrauchs, die Verbesserung der Betriebsbedingungen und die Minimierung von Emissionen. Da der Energieverbrauch wesentlich durch die hydrodynamischen Eigenschaften des Rumpfs, des Antriebs und der Anhänge bestimmt wird, sollen im Rahmen des Verbundprojekts *MariData* die verschiedenen Komponenten des Widerstands und der Propulsion besser modelliert, Verbrauchsdaten an Bord genauer gemessen und mit den tatsächlich vorliegenden See- und Wetterbedingungen sowie den resultierenden Schiffsbewegungen verknüpft werden.

Kerntechnologien, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden, umfassen digitale Zwillinge der Schiffe, parametrische Modelle für Schiffsgeometrien und Methoden zur Simulation der Hydrodynamik. Diese Technologien ermöglichen es, Schiffsgeometrien effizient zu rekonstruieren und präzise Vorhersagen über die Betriebsleistung zu treffen. Insbesondere spielen Sensordaten, die an Bord gesammelt werden, eine zentrale Rolle für das DSS und tragen zur kontinuierlichen Verbesserung der Schiffseffizienz bei.

2. Voraussetzungen des Vorhabens

Für die Entwicklung eines Decision Support Systems (DSS), das basierend auf Simulationsdaten den Kraftstoffverbrauch eines Schiffes in verschiedenen Umweltbedingungen berücksichtigt, benötigt es verschiedene Kompetenzen, die über Jahre bei den verschiedenen Projektpartnern aufgebaut wurden.

Im Mittelpunkt des Decision Support System stehen die Ersatzmodelle, die die Komponenten des Schiffswiderstandes und der Propulsion nachbilden. Für die Erstellung dieser Modelle ist die Erfahrung der Projektpartner im Bereich der Schiffssimulationen unabdingbar.

Die benötigten Geometrien der Schiffe, Propeller und Ruder werden von FRIENDSHIP SYSTEMS mit Hilfe von CAESES, ein CAE-System zum parametergesteuerten Entwurf, aufbereitet und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Dafür stehen umfangreiche Kenntnisse in der parametrischen Modellierung zur Verfügung.

3. Planung und Ablauf

Das Verbundprojekt *MariData* wurde im Dezember 2020 gestartet und lief nach einer kostenneutralen Verlängerung bis Mai 2024. Die Projektpartner umfassen die Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) – Projektleitung des Verbunds –, die Softwareanbieter AVL und FRIENDSHIP SYSTEMS (FSYS), Forschungseinrichtungen wie die Technische Universität Berlin (TUB), die Technische Universität Hamburg (TUHH), das Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST), das Maritime Zentrum der Hochschule Flensburg (FLE), 52°North (52N) und die Universität zu Lübeck (LUB), sowie Reedereien wie die Carl Büttner Shipmanagement GmbH (CBÜTT). Diese Zusammenarbeit ermöglicht es, praktische Erfahrungen aus dem Schiffsbetrieb mit innovativen Technologien zur Schiffssimulation zu verbinden.

FRIENDSHIP SYSTEMS, der Zuwendungsempfänger für das Teilprojekt *GeometricTwins*, konzentriert sich auf die Entwicklung digitaler geometrischer Zwillinge und parametrischer Modelle von Schiffen, die in das DSS integriert werden. Die HSVA und andere Partner sind für die hydrodynamischen Simulationen und die Validierung der Modelle verantwortlich. AVL befasst sich mit den Ersatzmodellen für die Antriebsmaschine. Die Routenoptimierung wird von 52North implementiert und die Hochschule Flensburg ist für die Entwicklung der Software für die Anwendung des DSS zuständig. Ein Überblick hierzu liefert Tabelle 1.

Tabelle 1: Arbeitspakete, Partner und Beteiligung von FRIENDSHIP SYSTEMS

Arbeitspaket (AP)	Beschreibung	Beteiligte Partner	Beteiligung von FRIENDSHIP SYSTEMS
AP1: Projektanforderungen, Spezifikationen und Implementierung	Festlegung der Anforderungen und Spezifikationen der Systemkomponenten sowie der Schnittstellen für den Datenaustausch.	52N, FSYS, HSVA, LUB, TUHH	Beteiligt an der Implementierung und Spezifikation von Schnittstellen für CAESES®.
AP2: Referenzschiffe und Datenerfassung	Auswahl und Modellierung der Schiffsgeometrie, Datenerfassung für die Simulation.	CBÜTT, DST, FSYS, HSVA, TUHH	Hauptverantwortlicher für die Schiffsgeometriemodellierung sowie für die Modellierung von Propulsionsorganen und Anhängen.
AP3: Analyse von Treibstoffverbräuchen und Zuordnung zu Ursachen	Entwicklung eines Moduls zur Analyse des Treibstoffverbrauchs und Trimmoptimierung.	DST, FSYS, HSVA	Unterstützung bei der Entwicklung der Kraftstoffverbrauchsanalyse und der Trimmoptimierung.
AP4: Integration und Software-Tests	Integration der entwickelten Komponenten in das DSS und Durchführung von Softwaretests.	52N, HSVA, LUB, TUHH	Nein
AP5: Einsatz und Tests im realen Betrieb	Durchführung von Feldtests mit den entwickelten Technologien auf ausgewählten Schiffen.	DST, HSVA, TUHH	Nein
AP6: Anwendungen und Validierung	Validierung der entwickelten Modelle und Technologien im praktischen Einsatz, Schulung und Trainingsmaterialien.	AVL, CBÜTT, FSYS, TUHH	Beteiligung an der Validierung und Entwicklung von E-Trainingskursen.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Das Projekt baut auf aktuellen Entwicklungen in den Bereichen Big Data, künstliche Intelligenz und Simulation auf. Die Einführung digitaler Zwillinge im Schiffsbetrieb ist eine zukunftsweisende Technologie, die es ermöglicht, Schiffsleistungen und -verbräuche besser vorherzusagen und anschließend zu optimieren. Die Kombination aus historischen Schiffs- und Umweltdaten und hochentwickelten Simulationstechniken bietet Betreibern eine fundierte Entscheidungsbasis für den täglichen Betrieb.

Die Beurteilung der hydrodynamischen Eigenschaften von Schiffen im Entwurfsstadium erfolgt heute durch numerische Berechnungen (CFD) und Modellversuche. Die gängigen numerischen Verfahren der Schiffshydrodynamik basieren entweder auf Potentialtheorie oder der Lösung der viskosen Strömung (RANS Solver). Sie werden im Entwurfsstadium von Werften und Entwurfsbüros entweder selber durchgeführt oder als Auftrag, meist an Versuchsanstalten, vergeben. Für diese Berechnungen muss ein vollständiges Geometriemodell des Rumpfes zur Verfügung stehen, auf dessen Basis sich die Gitter für die numerischen Berechnungsverfahren generieren lassen. Ein gängiges Format ist eine Triangulierung der Geometrieflächen, welches als STL-Datei abgespeichert werden kann.

Anders stellt sich die Situation im Schiffsbetrieb dar. Die Geometrieinformation eines Schiffes (Linien), seiner Propulsionsorgane (z.B. Propeller) und Anhänge (z.B. Ruder und Energy Saving Devices (ESD)) bleiben auch nach Ablieferung eines Schiffes Eigentum der Werft bzw. des Zulieferers und werden im Regelfall nicht extern zur Verfügung gestellt, sondern als Intellectual Property Rights (IPR) geschützt. Genaue Geometrie- und Leistungsdaten stehen dem Betreiber daher im Regelfall gar nicht, nicht in der notwendigen Qualität oder nicht in digitaler Form zur Verfügung. Die vorhandenen Informationen beschränken sich in aller Regel auf Schiffshauptmessungen und weitere hydrostatische Kenndaten. Infolgedessen ist eine verlässliche hydrodynamische Bewertung eines Schiffes ohne erhebliche Aufwände schwer bis unmöglich.

Prinzipiell lassen sich die fehlenden Geometriedaten erzeugen, indem die aus unterschiedlichen Quellen verfügbaren Informationen für ein Reengineering des Rumpfs, der Propulsionsorgane und der Anhänge herangezogen werden. Hierfür muss ein CAE-Spezialist, etwa an einer Versuchsanstalt, i.d.R. mehrere Tage Arbeit investieren. Der hiermit verbundene Aufwand (Vorlaufs- und Bearbeitungszeiten sowie Kosten) hat zur Folge, dass dies nur selten stattfindet, beispielsweise bei auftretenden Problemen, die eine aufwändige Analyse rechtfertigen. Hinzu kommt, dass bei einer manuellen Aufbereitung der Geometrie meist nur eine einzige Instanz realisiert wird, die zudem stark von der Erfahrung des Bearbeiters oder der Bearbeiterin abhängt. Eine Quantifizierung von Abhängigkeiten der hydrodynamischen Performance von kleinen bis mittleren Formvariationen, die ebenfalls den verfügbaren für das Reengineering herangezogenen Informationen entsprechen würden, stellt, wenn überhaupt, nur den Ausnahmefall dar.

Eine Möglichkeit zum Reengineering der fehlenden Geometrieinformation kann auf eine bereits seit mehreren Jahren im Simulation-driven Design (SDD) eingesetzten Technik aufgebaut werden: Durch eine intelligente Modellierung der Geometrie mittels eines parametrischen Modells lassen sich robust und vollautomatisch eine geeignete Anzahl

von Varianten erzeugen. Diese Art der Geometrieerzeugung ist Grundlage der von FRIENDSHIP SYSTEMS entwickelten PIDO Umgebung CAESES® zur parametrischen Modellierung, Kopplung externer CAx-Systeme (insb. zur Strömungssimulation) und automatisierten Optimierung. Für den Entwurf neuer Schiffe sowie von Komponenten des Turbomaschinen- und des Motorenbaus stellt das SDD einen anerkannten Stand der Technik dar.

Während vor 10 bis 15 Jahren meist nur ein Betriebspunkt, z.B. die Entwurfsgeschwindigkeit auf Entwurfstiefgang, zur Optimierung eines Schiffsrumpfs herangezogen wurde, werden seit fünf bis zehn Jahren zunehmend Mehrkriterienoptimierungen durchgeführt, etwa hinsichtlich des Brennstoffverbrauchs für einen häufigkeitsgemittelten Mix aus verschiedenen Geschwindigkeiten und Tiefgängen im Glattwasser sowie des Verhaltens in den erwarteten Seegängen. Viele der zurzeit in Fahrt befindlichen älteren Handelsschiffe wurden aber, bedingt durch das Fehlen ausreichend guter Modellier- und Variationsverfahren sowie genauer Simulationsmethoden zum Zeitpunkt des Entwurfs, weder für einen noch für mehrere Betriebspunkte optimiert. Dies bedeutet, dass ein Potenzial zur weiteren Verbesserung der Energieeffizienz in der Schifffahrt vorliegt.

5. Zusammenarbeit

Wie aus der Übersicht der Arbeitspakete zu entnehmen ist, wurden die einzelnen Arbeitspakete mit den anderen Projektpartnern gemeinsam bearbeitet. Hierbei ist zu beachten, dass vor allem die Geometriemodellierung ohne die direkte Beteiligung der Projektpartner am Aufbau der Parametermodelle von FRIENDSHIP SYSTEMS durchgeführt wurde. Den Partnern wurden die Geometrien (Rümpfe, Ruder, Propeller etc.) für weiterführende Arbeiten bereitgestellt. Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern fand zudem bei der Festlegung der Spezifikationen des DSS, der Validierung der Ersatzmodelle und der gemeinsamen Anwendung auf das Beispielschiff von Carl Büttner statt.

II. Eingehende Darstellung des Teilprojekts *GeometricTwins*

Das Teilprojekt *GeometricTwins* ist ein wesentlicher Bestandteil von *MariData* und konzentriert sich auf die Entwicklung von Methoden zur Rekonstruktion von Schiffsgeometrien auf Basis unvollständiger Informationen seitens der Werft bzw. des Zulieferunternehmens. Diese digitalen Zwillinge werden verwendet, um den Schiffsbetrieb zu optimieren und Simulationen zur Leistungssteigerung durchzuführen. Im Folgenden werden die Arbeitspakete und Ergebnisse beschrieben.

1. Erzielte Ergebnisse

AP1: Projektanforderungen und Spezifikationen

Das erste Arbeitspaket diente der Definition der technischen und funktionalen Anforderungen für die Entwicklung der digitalen Zwillinge. FRIENDSHIP SYSTEMS arbeitete eng mit den Projektpartnern zusammen, um die Anforderungen an das Decision Support System (DSS) zu spezifizieren, siehe Bild 1.

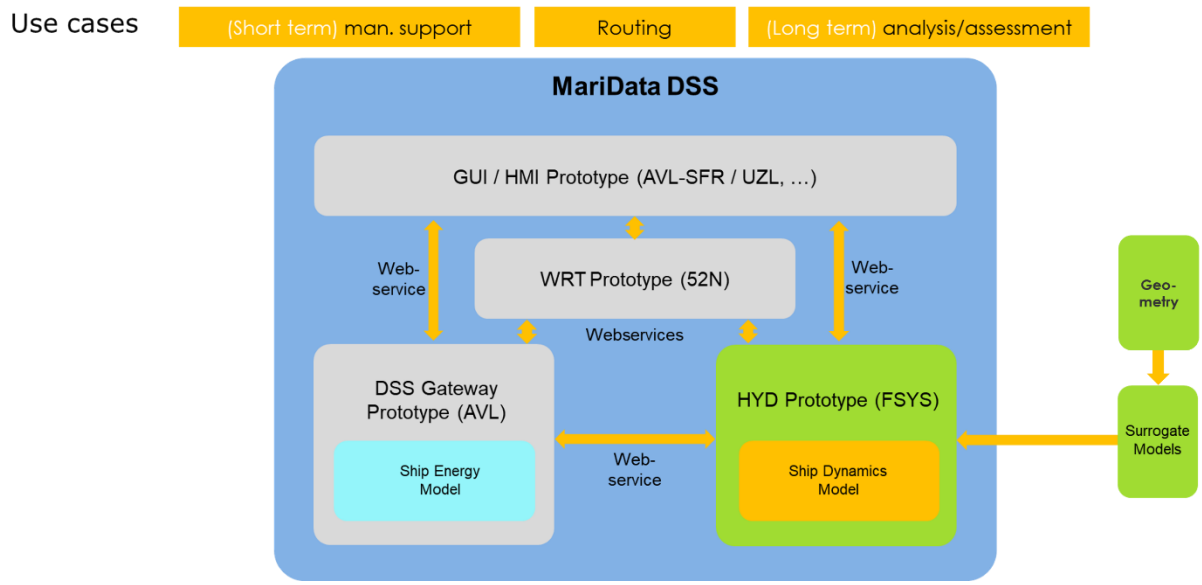


Bild 1: MariData DSS

Dabei wurden spezifische Nutzerschnittstellen und die für den Datenaustausch notwendigen Systemkomponenten festgelegt. Im Rahmen des Projekts wurde eine leistungsfähige REST API in C++ unter Verwendung des Qt Frameworks implementiert, um den Austausch und die Verarbeitung von Surrogat-Modellen des DSS zu ermöglichen. Diese API erlaubt das Hochladen von in CAESES generierten Surrogat-Modellen, die für simulationsgestützte Optimierungen und Prognosen verwendet werden können. Die Basis der Surrogat-Modelle bildet Dakota Surfpack, ein etabliertes Toolkit zur Analyse und Auswertung von Ersatzmodellen. Über die REST API können Benutzer nicht nur die Modelle hochladen, sondern diese auch evaluieren, um Vorhersagen durchzuführen.

Die API nutzt die umfassenden Möglichkeiten von Qt, insbesondere für die effiziente Handhabung von HTTP-Anfragen. Die Upload-Schnittstelle erlaubt es, Modellbeschreibungen in standardisierten Dateiformaten zu übermitteln, die serverseitig validiert und gespeichert werden. Eine zusätzliche Evaluationsschnittstelle bietet die Möglichkeit, gezielt Eingabewerte zu übermitteln, welche die API durch das Surrogat-Modell verarbeitet, um entsprechende Ausgabewerte zurückzugeben.

Die zentrale Verwaltung der Ersatzmodelle erlaubt die Verwendung durch die Partner, ohne die Daten an die Endnutzer weitergeben zu müssen. Darüber hinaus ermöglicht

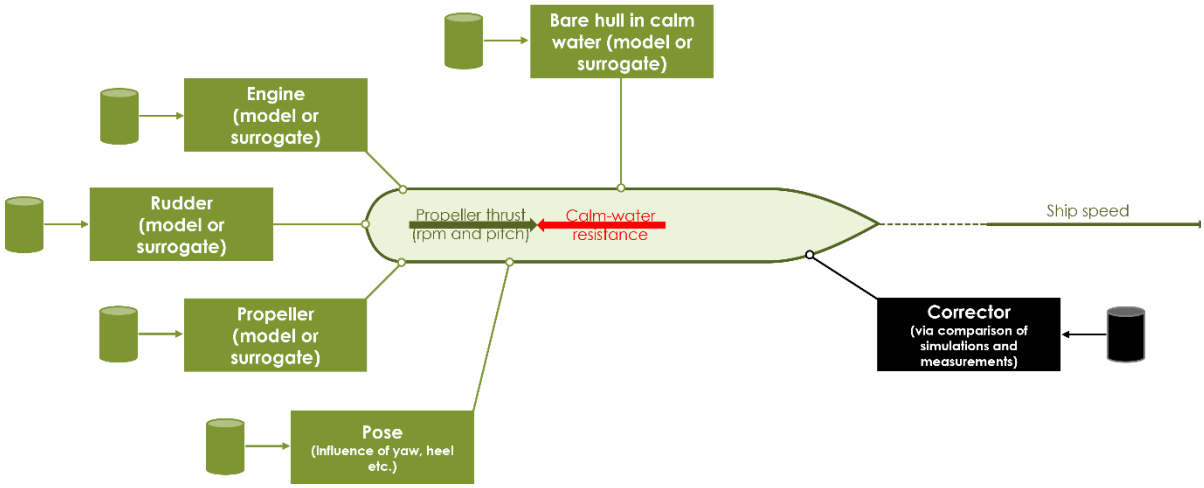
diese ein Versionsmanagement und garantiert, dass alle Partner stets die gültige Version der Ersatzmodelle verwenden.

Die Architektur der API wurde auf Erweiterbarkeit und Performanz optimiert, um auch bei großen Datenmengen zuverlässig zu funktionieren. Zudem stellt die REST API sicher, dass sie mit bestehenden Werkzeugen und Workflows kompatibel ist, was sie ideal für den Einsatz in simulationsgetriebenen Entwicklungsumgebungen macht.

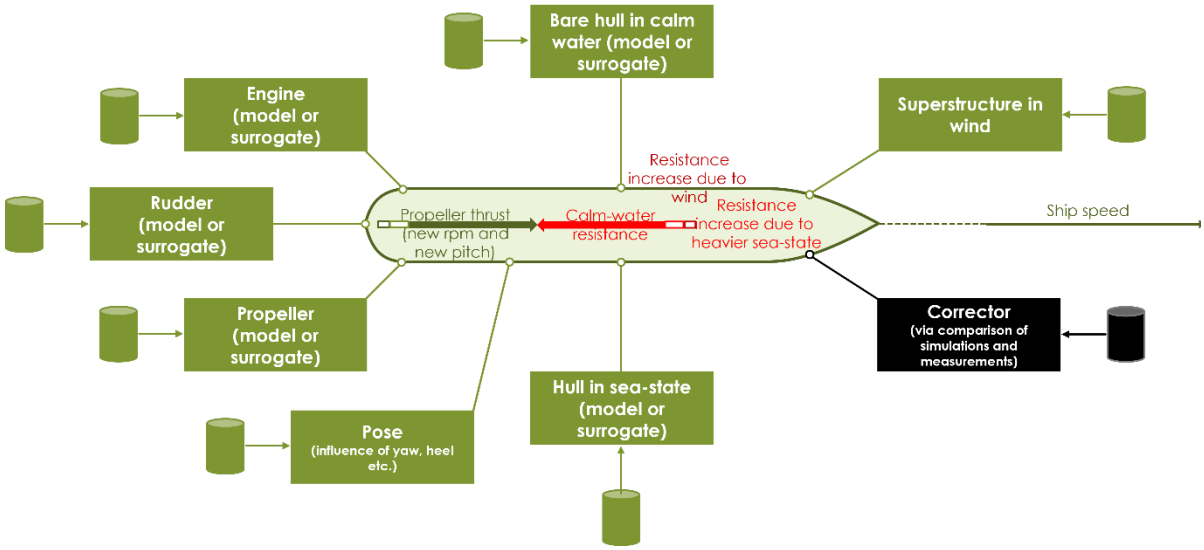
Die bereitgestellten Ersatzmodelle wurden über den API-Server in dem von der TUHH entwickelte, Python-basierten Prognoseverfahren abgefragt. Hierbei hat FRIENDSHIP SYSTEMS eng mit der TUHH zusammengearbeitet und erforderliche Verbesserungen am API-Server, wie beispielsweise eine parallele Abfrage, welche den Datenaustausch beschleunigt hat, vorgenommen. Die Nutzung der Ersatzmodelle in der Routenoptimierung durch 52North erfolgt nun, entgegen ursprünglichen Überlegungen, nicht durch eine direkte Anfrage von 52North an den API-Server von FRIENDSHIP SYSTEMS, sondern ebenfalls über das Prognoseverfahren der TUHH.

Ein integraler Bestandteil des Decision Support Systems ist das Ship Dynamics Model. Zusammen mit den Hydrodynamik-Projektpartnern wurde spezifiziert, welche Umwelteinflüsse berücksichtigt werden müssen, um das Schiffsverhalten in Fahrt ausreichend genau widerspiegeln zu können. Dabei kann von einem Grundzustand ausgegangen werden, dem Schiff im Glattwasser (Bild 2 (A)). In den unterschiedlichen Betriebszuständen bildet der Widerstand des Schiffes ein Kräftegleichgewicht mit der Vortriebskraft bei konstanter Geschwindigkeit. Die verschiedenen Komponenten des Kräftegleichgewichts werden durch jeweilige Ersatzmodelle implementiert.

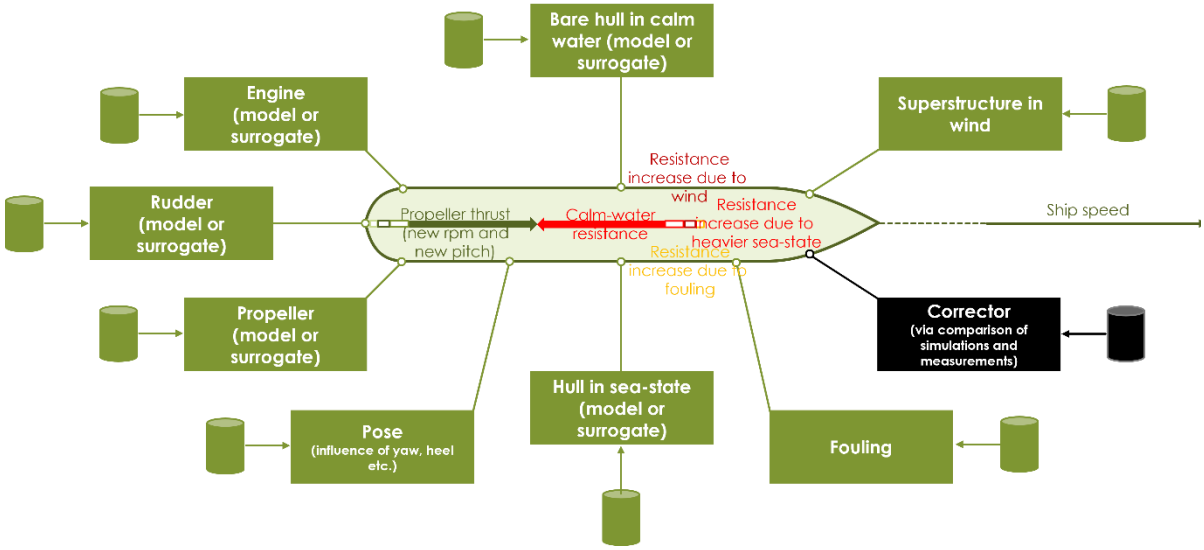
Befindet sich das Schiff im Seegang (Bild 2 (B)) oder im Seegang mit zusätzlichen Einflüssen, wie zum Beispiel Fouling, (Bild 2 (C)), werden diese Komponenten des Kräftegleichgewichts durch weitere Ersatzmodelle abgebildet. Bilder 2 (A) bis (C) zeigen dabei auf, dass zusätzliche Komponenten modular hinzugefügt werden können.



(A) Schiff im Glattwasser



(B) Schiff im Seegang



(C) Schiff im Seegang bei starkem Wind, Strom und unter Einfluss von Bewuchs

Bild 2: Ship Dynamics Model für unterschiedliche Betriebssituationen

Da eine exakte Vorhersage der realen Betriebsbedingungen durch die Ersatzmodelle nahezu ausgeschlossen ist, wurde ein Korrektur-Ersatzmodell vorgesehen, welches den berechneten Betriebszustand basierend auf historischen Daten des Schiffes anpasst. Ein Beispiel wäre, dass mit der Verwendung aller Ersatzmodelle eine Prognose des Kraftstoffverbrauchs bei starkem Seegang immer um 2% vom real gemessenen Wert abweicht. Nach mehreren Fahrten kann dieser Unterschied im Korrektur-Ersatzmodell aufgenommen werden, wodurch sich die Vorhersagegenauigkeit in diesen Betriebsbedingungen deutlich erhöht (grey model).

Für das oben beschriebene Ship Dynamics Model wurde die Annahme getroffen, dass eine lineare Superposition der einzelnen Komponenten ausreicht. Gegenseitige Einflüsse bleiben unberücksichtigt wie etwa der Einfluss von Fouling auf das Seegangsverhalten eines Schiffes und die daraus resultierenden Zusatzwiderstände. Die in *Marzi, Harries et al. (2024)* veröffentlichen Ergebnisse – Vergleich Messungen zu Simulationen – zeigen, dass diese Annahme für den Carl Büttner Tanker akzeptabel ist.

AP2: Referenzschiffe und zugehörige Datenerfassung

Das zweite Arbeitspaket widmete sich der Auswahl und Analyse von Referenzschiffen, die als Grundlage für die Entwicklung der digitalen Zwillinge dienten. Das zentrale Referenzschiffe des Projekts ist der sog. Carl Büttner Tanker (CBT) des Partners Carl Büttner Shipmanagement, dessen Geometrie in verschiedenen Detailstufen modelliert wurde. Die Modelle reichten von einfachen Parametermodellen (Level 1) bis hin zu hochpräzisen Nachbildungen der Originalgeometrie (Level 3) und wurden sowohl bezüglich der hydrostatischen als auch der hydrodynamischen Eigenschaften analysiert. Zusätzlich wurde ein weiteres Parametermodell erstellt, um schlankere Schiffe, wie den Heavy Lift Carrier vom Projektpartner SAL, nachzumodellieren.

Parametermodell

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die drei spezifizierten Level der Geometriemodellierung. Die Level deuten dabei die erzielte Genauigkeit hinsichtlich einer Nachmodellierung einer existierenden Schiffsgeometrie an. Zu Beginn des Projektes waren die verschiedenen Level noch als starre und getrennte Parametermodelle gedacht. Dies konnte jedoch während der Projektlaufzeit zu einem Spektrum der Genauigkeit erweitert werden, siehe Bild 3. Dieses Spektrum wird durch ein einziges flexibles Parametermodell abgebildet.

Tabelle 2: Level des Parametermodells - Genauigkeiten der Geometrie

Level	Beschreibung	Genauigkeiten der Geometrie
Level 1	• Nur die Hauptabmessungen sind bekannt (ähnlich zur Konzeptphase) • Außerdem sind Deadweight (DWT) und die Bremsleistung der Hauptmaschine gegeben ○ Entwurfsgeschwindigkeit muss abgeschätzt werden	• Erwartete Abweichung der Geometrie liegt bei +/- 1m bis 2m im Vor- und Hinterschiff • Verdrängung kann um 5% abweichen
Level 2	• Level 1 ergänzt durch zusätzliche Daten aus dem Generalplan ○ Ausgewählte Geometrien (z.B. Bug- und Heckkonturen, Hauptspant, Spanten im Vor- und Hinterschiff) sowie Größen aus dem Stabilitätshandbuch (z.B. XCB als Funktion des Tiefgangs)	• Maximale Abweichung zwischen entworfener und modellierter Geometrie sollte bei +/- 2cm bis 10cm liegen • Verdrängung kann um 1% abweichen

Level 3	• Level 2 ergänzt durch zusätzliche Daten, etwa
	  ○ Daten aus Modellversuchen
	  ○ Daten aus Probefahrten
	  ○ Messungen während des Betriebs
	  ○ Laserscans vom Rumpf, Ruder, Propeller etc.
		• Unterschiede des „nachmodellierten“ Schiffs sind ähnlich den Unterschieden des ursprünglich modellierten zum „gebauten“ Schiff

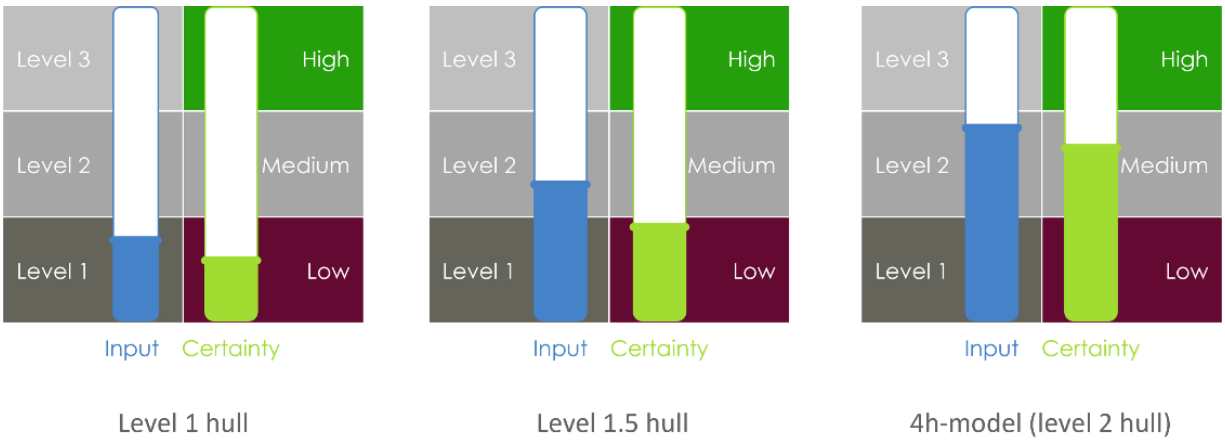


Bild 3: Einteilung der Level der Nachmodellierung innerhalb eines Spektrums von vorliegenden Inputs und erreichten hydrodynamischen Genauigkeiten

Parametermodell für Tanker – am Beispiel des Carl Büttner Tanker

Ein flexibles Parametermodell wurde entwickelt, das auf minimalen Eingangsdaten basiert und sukzessive durch zusätzliche Informationen angereichert werden kann. Bild 4 zeigt das Parametermodell für Tanker.

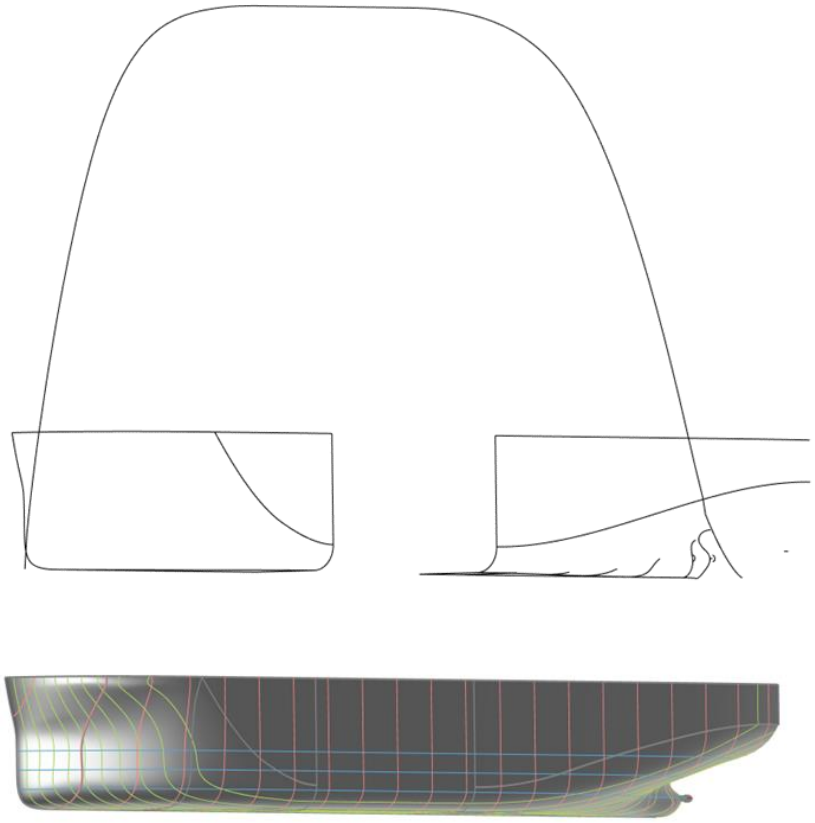


Bild 4: Parametermodell für Tanker

Für die Level 1 Geometrie wurde das Modell durch wenige grundlegende, öffentlich zugänglichen Abmessungen angepasst. Andere Merkmale der Geometrie wurden durch Werte angereichert, die i.A. nicht zur Verfügung stehen, aber guter schiffbaulicher Entwurfspraxis entsprechen (z.B. Abstimmung der Schulterpositionen nach Elementarwellen für eine angenommene Entwurfsgeschwindigkeit, Abschätzung der Verdrängung anhand des DWT). Die Bilder 5 und 6 zeigen einen Vergleich der Level 1 Geometrie mit der Originalgeometrie.

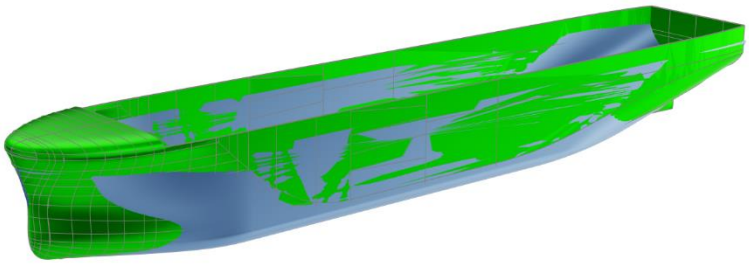


Bild 5: *Globaler Vergleich von tatsächlicher Geometrie (grün) und auf Level 1 vollparametrisch erzeugter Geometrie (blau) für den CBT*

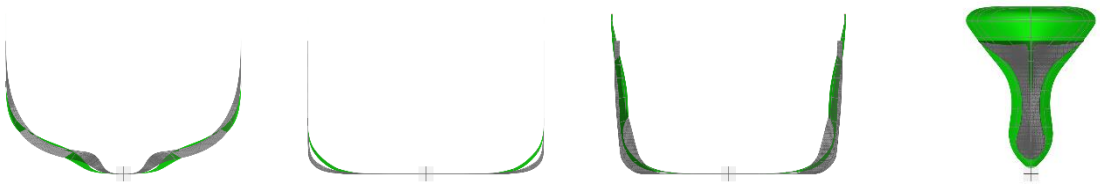


Bild 6: Lokaler Vergleich von tatsächlicher Geometrie (grün) und auf Level 1 vollparametrisch erzeugter Geometrie (grau) für den CBT

Für das nächsthöhere Level (hier im Sinne eines fließenden Übergangs Level 1.5 genannt) wurden hydrostatische Daten auf Entwurfstiefgang herangezogen, wie sie einer Reederei auf Basis des Stabilitätshandbuchs bereits bekannt oder zügig recherchierbar sind. Bei der Nachmodellierung nach Level 2 wurden Geometriedaten wie die Stevenkontur, das Seitenflach, das Bodenflach sowie einige ausgewählte Spanten im Vor- und Hinterschiff gemäß des digital vorliegenden Generalplans herangezogen.

Wichtig ist im Zusammenhang der Level 1 Modellierung, dass Vergleichsdaten zur tatsächlichen Geometrie außerhalb eines F&E-Projekts nicht vorhanden sind. Hier wird man hinsichtlich der zu erwartenden Performance nur statistische Aussagen zu Mittelwerten und Standardabweichungen treffen können; allerdings nicht auf Basis von gebauten Vergleichsschiffen, sondern auf Basis einer numerischen Untersuchungskampagne.

Bild 7 zeigt die Inputmaske des Parametermodells und Bild 8 zeigt, wie das Parametermodell in CAESES zur Verfügung gestellt werden könnte. Die Eingabewerte in der blauen Box können dem Level 1 zugeordnet werden; die Parameter in der grünen Box und die Eingaben in Form von geometrischen Kurven (z.B. Bodenflach) und verschiedene Spanten in der roten Box verändern das Modell im Spektrum des Level 2.

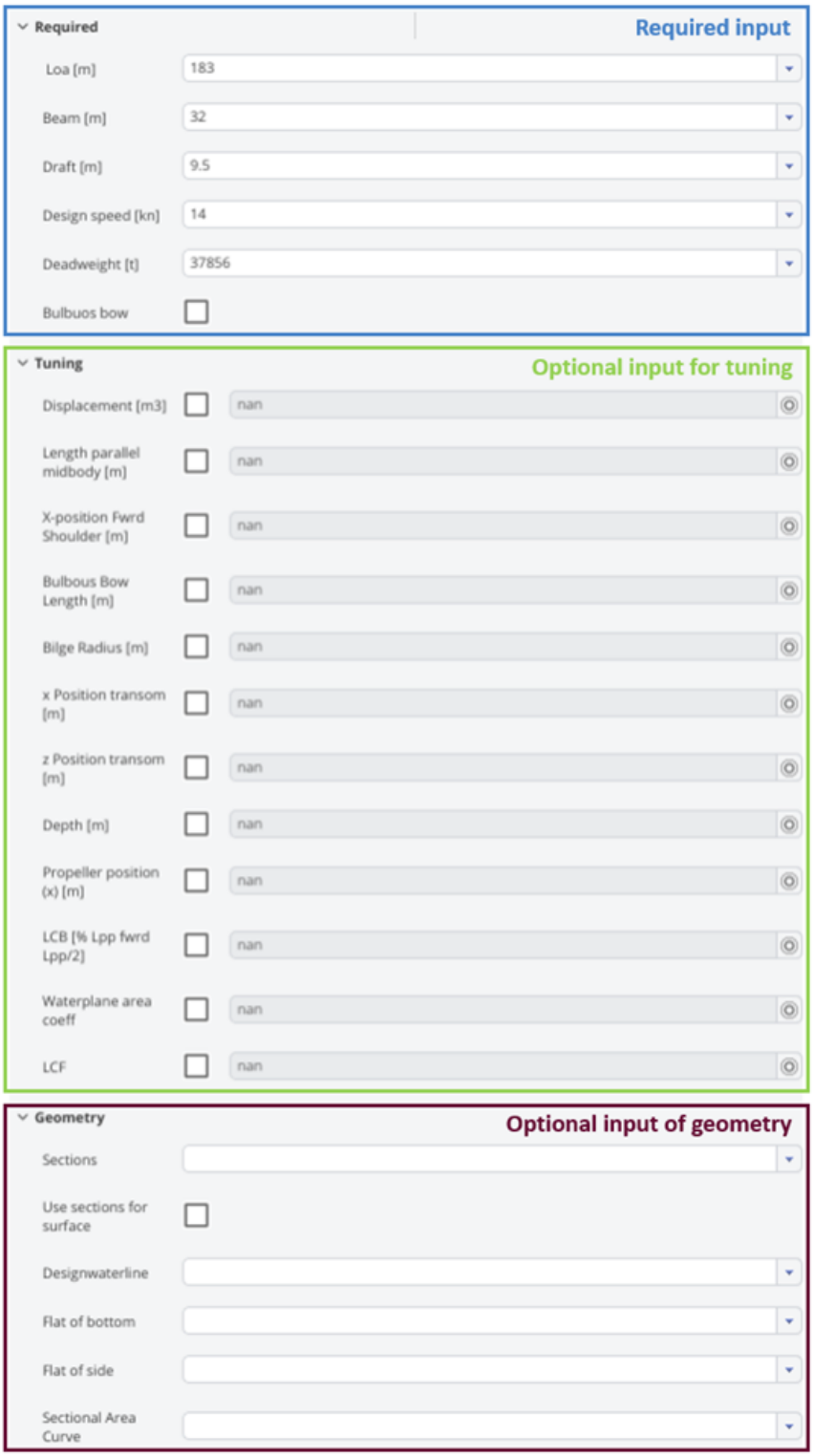


Bild 7: Inputs für die Geometrieerzeugung innerhalb CAESES®

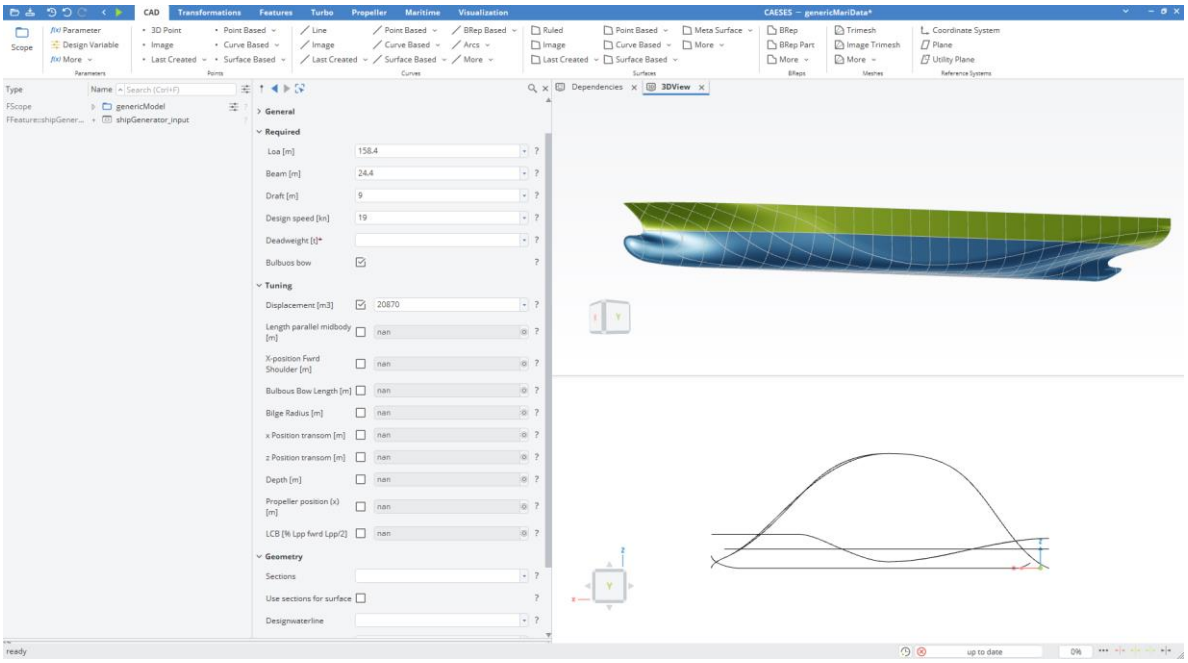


Bild 8: Parametermodell in CAESES - hier: ausgefüllt für Level 1 am Beispiel des Heavy Lift Carriers

Zusätzlich war eine Aufbereitung der Daten für Ruder und Propeller der Originalgeometrie des CBT notwendig, um Simulationen durchführen zu können. Es wurde ein flexibles vollparametrisches Modell für Ruder entwickelt, mit dem sich sowohl freischwebende als auch Spatenruder erzeugen und gemäß den vorliegenden Abmessungen einstellen lassen, siehe Bild 9. Das Parametermodell erlaubt außerdem, Ruder mit und ohne Costa Bulb zu erzeugen. Zudem können zur Vorbereitung für die numerische Strömungssimulation Details der Geometrie geschlossen oder zusammengefasst werden (z.B. Spalte beim Halbschweberuder).

Bild 9: Vollparametrisches Rudermodell, hier mit Costa Bulb

Bild 10 zeigt einen Teil des parametrischen Rudermodells in CAESES, welches auch die Grundlage für eine WebApp ist. Zu sehen sind die Begrenzungskurven in der Seiten- (Side View) und Frontansicht (Front View).

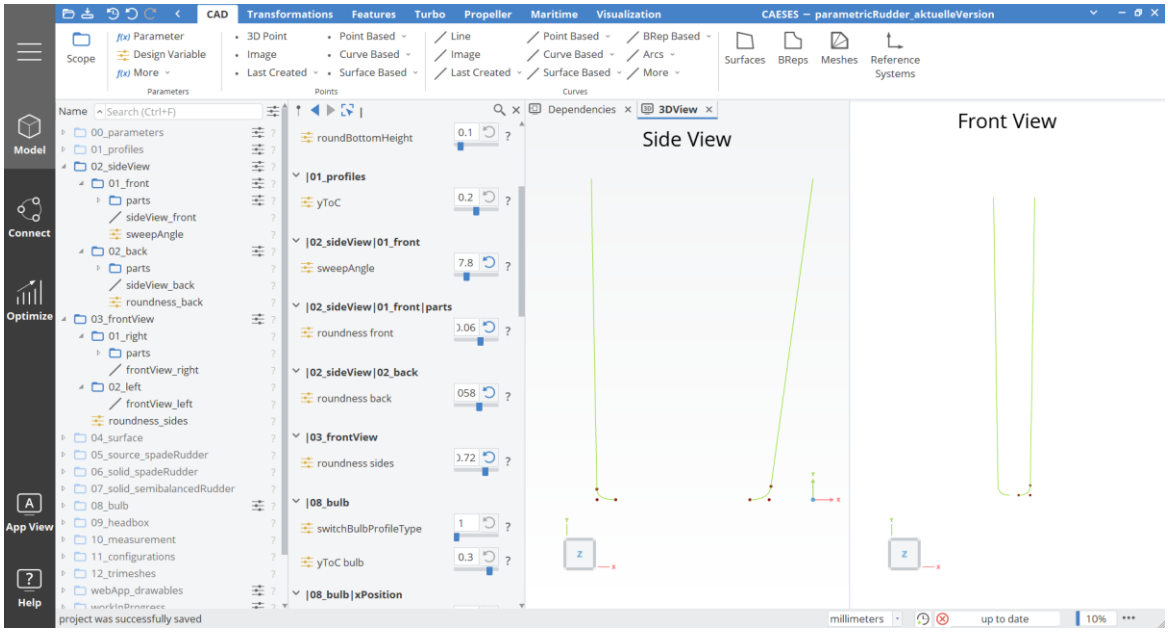


Bild 10: Parametrisches Rudermodell in CAESES

Die komplexe Geometrie des originalen Tip-rake Propellers wurde mittels eines adaptierten Parametermodells innerhalb von CAESES nachmodelliert und für numerische Strömungssimulationen vorbereitet, siehe Bild 11.

(A) Geometrie gemäß Import

(B) Vollparametrische Modellierung und Näherung an die Originalgeometrie

Bild 11: Originalgeometrie vs. Nachmodellierung mittels eines vollparametrischen Modells

Analyse des Parametermodells für Tanker

Zusammen mit dem Projektpartner HSVA wurde eine hydrostatische und hydrodynamische Analyse des Parametermodells für Tanker durchgeführt. Es wurden drei Geometrien mit Hilfe des Parametermodells angefertigt. Eine Geometrie, die dem Level 1

zuzuordnen ist, eine Geometrie, die im Genauigkeitsspektrum zwischen Level 1 und Level 2 liegt (und im Folgenden als Level 1.5 bezeichnet wird) sowie eine Geometrie, die im Level 2 (in Bild 12 „4h-model“ genannt) liegt.

Bild 12 zeigt einen Vergleich der Hydrostatik für die verschiedenen Levels der Nachmodellierung. Level 1 weist, erwartungsgemäß, die größten Abweichungen auf, während Level 1.5 den Schwerpunkt der Verdrängung auf Entwurfstiefgang genau trifft, da dieser als Input verwendet wurde. Für das Level 2 Modell (in der Grafik 4h-model) wurde das Hinterschiff vereinfacht nachmodelliert, jedoch die Asymmetrie vernachlässigt, wodurch weiterhin eine gewisse Abweichung des Schwerpunkts über alle Tiefgänge vorliegt.

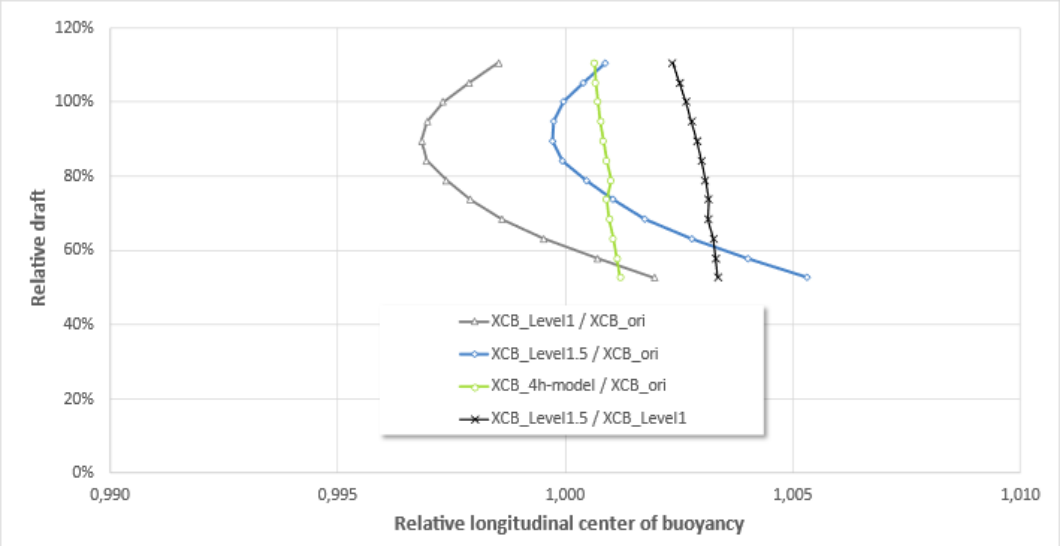
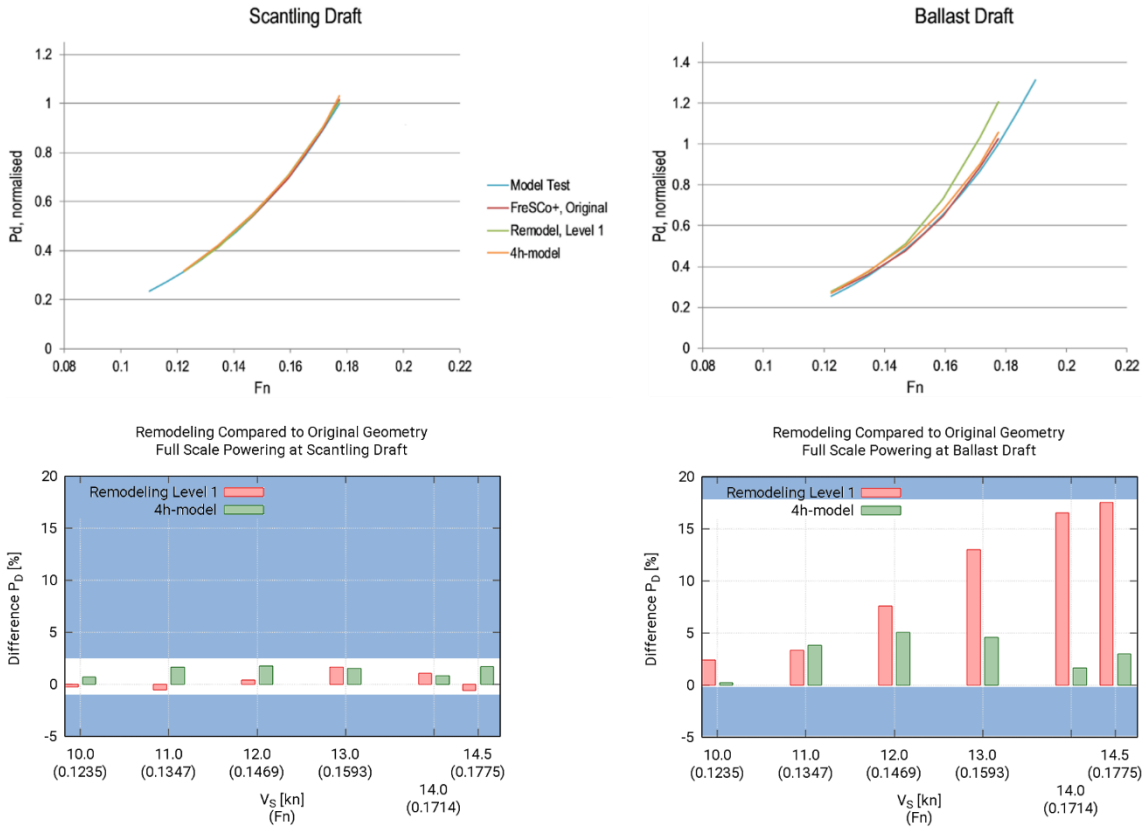


Bild 12: Vergleich ausgewählter Werte der Hydrostatik für verschiedene Levels der Nachmodellierung (hier dimensionslose Längsposition des Schwerpunkts der Verdrängung über dimensionslosem Tiefgang)

Bild 13 stellt einen Vergleich der Hydrodynamik dar. Die Berechnungen wurden von der HSVA durchgeführt, siehe *Harries et al. (2022)*. Auf Scantling-Tiefgang ist eine überraschend gute Übereinstimmung für alle Nachmodellierungen zu verzeichnen, die jedoch als zufällig anzusehen ist und für ein anderes Schiff höchstwahrscheinlich so nicht auftritt. Auf Ballasttiefgang sind teilweise sehr große Unterschiede, vor allem bei der Level 1 Geometrie, zu erkennen. Dies untermauert die Notwendigkeit guter Nachmodellierung der Geometrie, um geeignete Digitale Zwillinge zur Verfügung zu stellen.

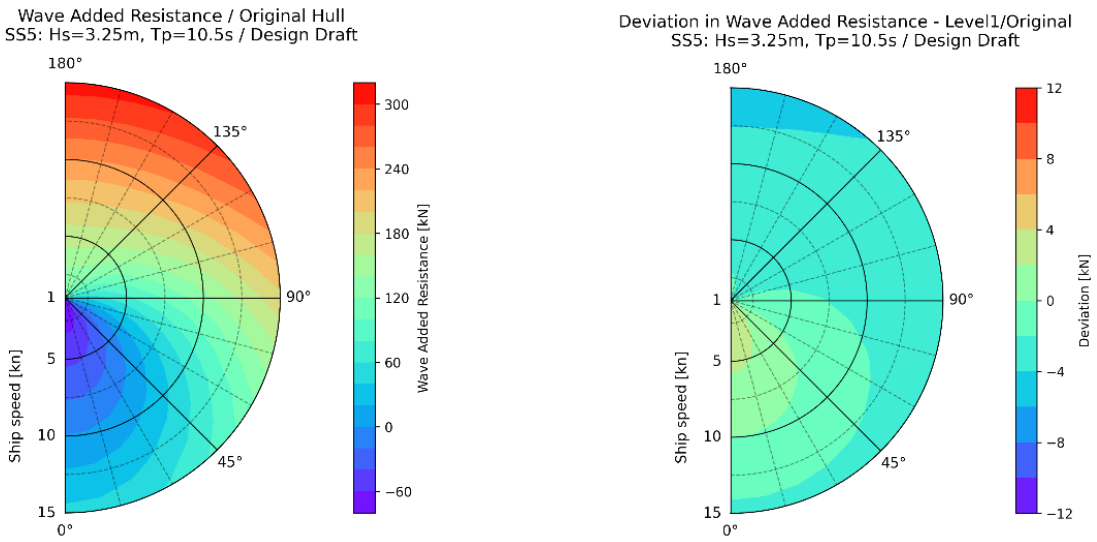


(A) Propellerdrehleistung (P_D) auf Scantling Tiefgang (oben: absolut; unten: relative Abweichung)

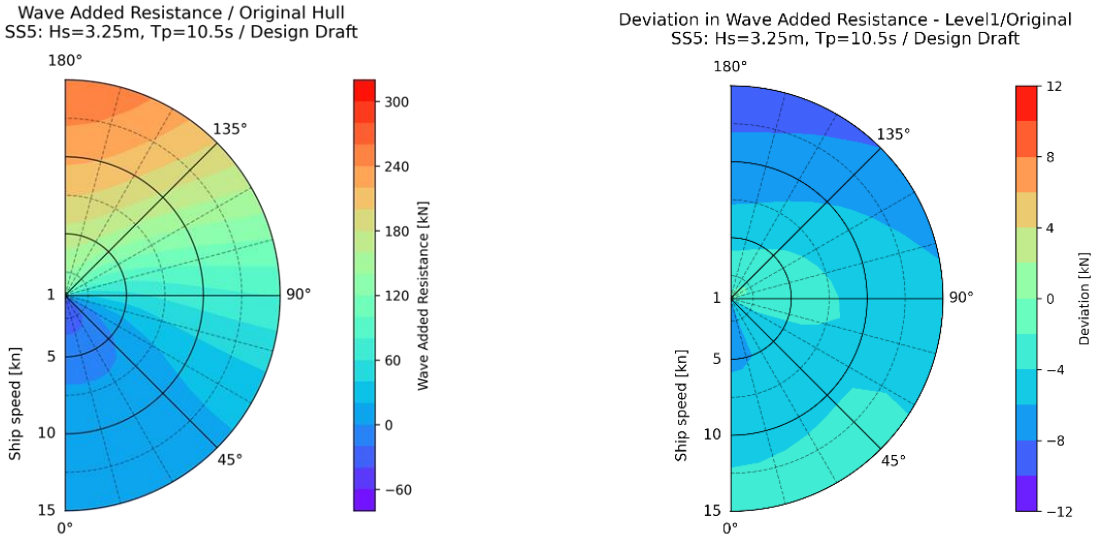
(B) Propellerdrehleistung (P_D) auf Ballast Tiefgang (oben: absolut; unten: relative Abweichung)

Bild 13: Vergleich ausgewählter Werte der Hydrodynamik für verschiedene Levels der Nachmodellierung

Zusätzlich wurde gemeinsam mit der HSVA Berechnungen des Zusatzwiderstands im Seegang durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde an einem Beitrag zum 8th International Symposium on Ship Operations, Management and Economics & Maritime Exhibition gearbeitet, siehe *Harries et al. (2023)*. Bild 14 zeigt einen Vergleich zweier Simulationsmethoden für zwei verschiedene Rümpfe, der Originalgeometrie und der Level 1 Geometrie.



(A) Zusatzwiderstand im Seegang für den Originalrumpf (links) und Abweichungen für Simulationen auf Basis des Level1-Rumpfs mittels SNMM (rechts)



(B) Zusatzwiderstand im Seegang für den Originalrumpf (links) und Abweichungen für Simulationen auf Basis des Level1-Rumpfs mittels UTStrip (rechts)

Bild 14: Zusatzwiderstände im Seegang für den Carl Büttner Tanker

Diese Studie zeigt, dass nicht nur die Genauigkeit der Geometrie eine wichtige Rolle bei der Generierung von Daten für die Ersatzmodelle spielt, sondern auch die Wahl der Simulationsmethoden. Auch hier könnte eine Einteilung in Genauigkeitslevel sinnvoll sein, von einer einfachen empirischen Methode bis zur genaueren, jedoch sehr viel Ressourcen-intensiveren RANS-Simulation.

Des Weiteren wurde in Kooperation mit dem Partner TU Berlin ein blockstrukturiertes Gitter für den CBT zur Berechnung der hydrodynamischen Kräfte und Momente mit dem Ziel der Prognose des Manövrierverhaltens im Glattwasser erstellt. Hierfür wurde das

nachmodellierte Ruder, welches mit dem von FRIENDSHIP SYSTEMS entwickelten vollparametrische Rudermodell erstellt wurde, und die aufbereitete Geometrie des CBT verwendet. Für die Vergitterung wurde die Software GridPro mit Hilfe eines Software Connectors an CAESES angebunden. Hierbei konnte FRIENDSHIP SYSTEMS und der Partner TUB von einer verbesserten CAESES Integration und verbesserten Methoden zur Erstellung von sogenannten internal Surfaces in CAESES profitieren. Das Gitter wurde mit GridPro im Modellmaßstab erzeugt und weist non-matching Interfaces auf. Das Ruder wurde in einer speziellen Ruderbox vergittert, siehe Bild 15.

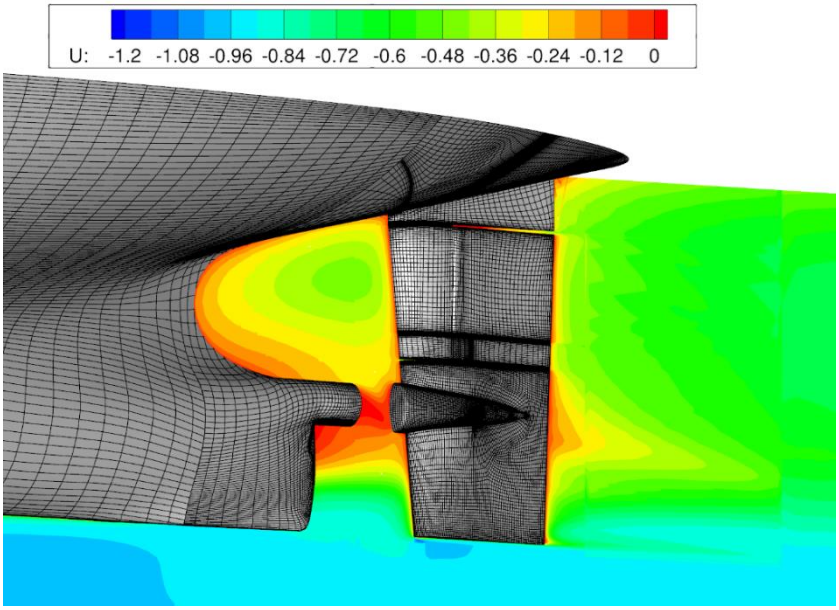


Bild 15: Gitter im Hinterschiffsbereich und auf dem Ruder für den CBT

Zur Überprüfung des Konvergenzverhaltens des generierten Gitters wurden erste Berechnungen für eine stationäre Geradeausfahrt durchgeführt, welche eine zufriedenstellende Konvergenz aufweisen. In Bild 16 ist deutlich das asymmetrische Nachstromfeld der Originalgeometrie zu sehen und Bild 17 illustriert die resultierende Druckverteilung.

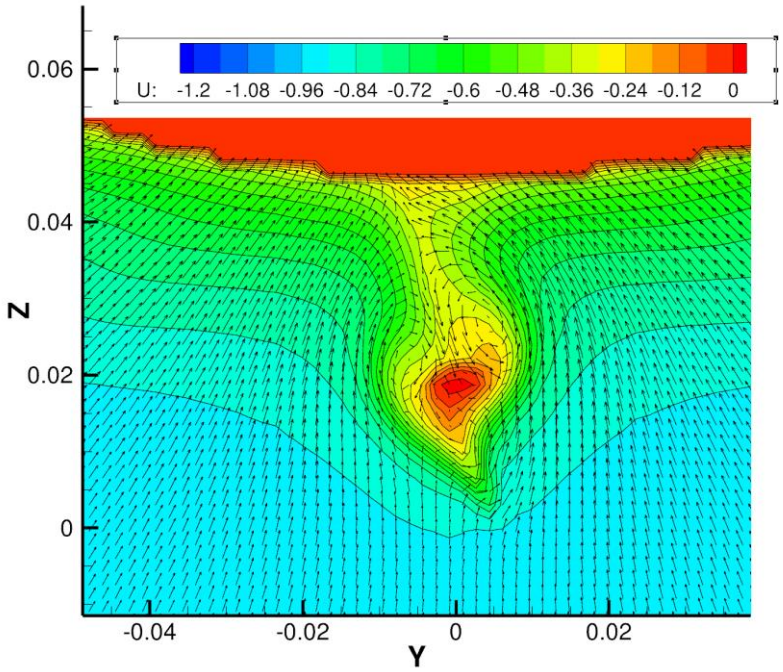


Bild 16: Asymmetisches Nachstromfeld des CBT (stationäre Geradeausfahrt)

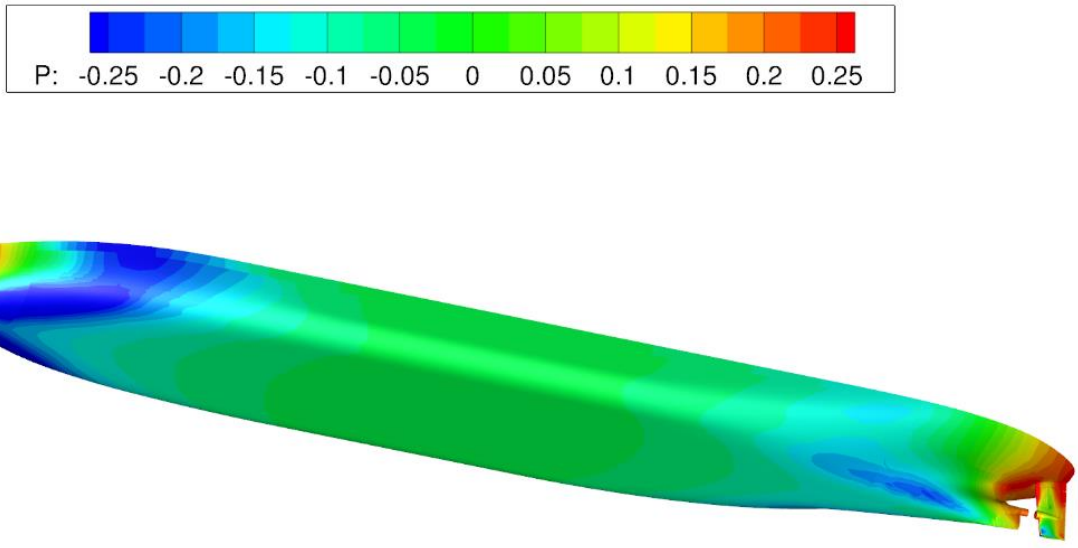


Bild 17: Druckverteilung auf dem Rumpf des CBT (stationäre Geradeausfahrt)

Parametermodell für schlanke Schiffe – am Beispiel des SAL Heavy Lift Carriers

Basierend auf dem ersten, speziell für völlige Schiffe entwickelnden Parametermodell, wurde ein zweite Modell entwickelt, was auch für schlankere Schiffe mit Bugwulst, wie dem Heavy Lift Carrier, angewendet werden kann, siehe Bild 18. Die Funktionalität des Modells ähnelt dem Parametermodell für Tanker (als repräsentatives Beispiel für Schiffe

mit hohem Blockkoeffizienten), d.h. auch dieses Modell kann Eingaben verwenden, die von Daten des Level 1 (Hauptabmessungen) bis hin zu ausgewählten geometrischen Kurven reichen (z.B. SAC, DWL und ausgewählte Spanten) wie sie für Level 2 dienen.

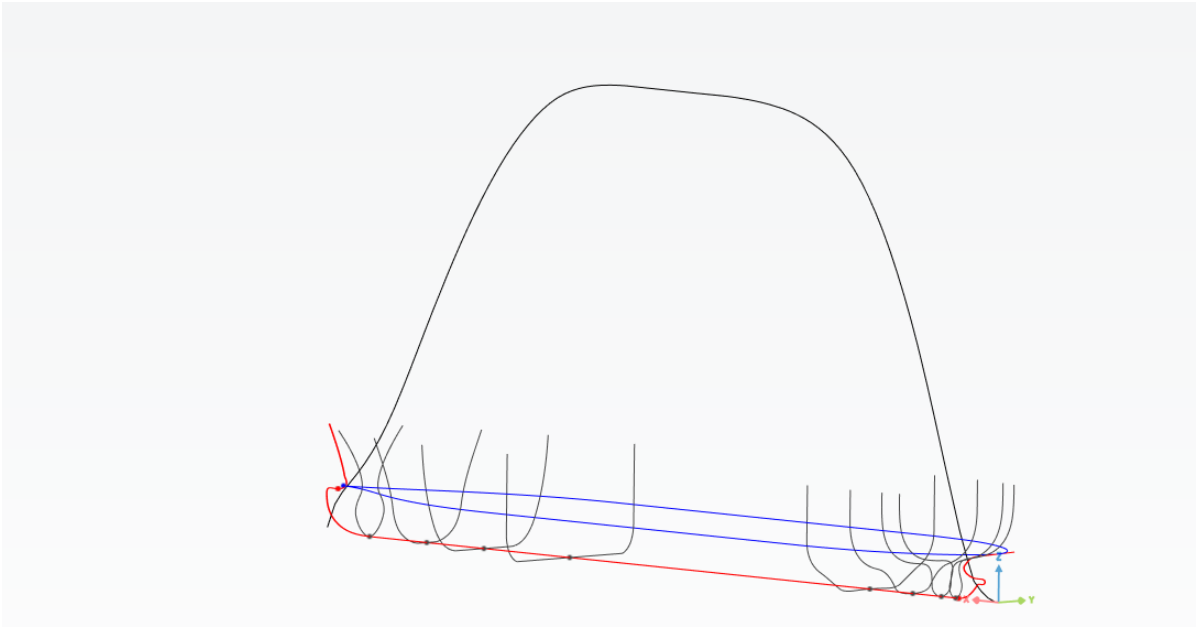


Bild 18: Ausgewählte Spanten, DWL und SAC

Um den Übergang von einem parametrischen Modell zu einem Modell auf der Grundlage ausgewählter geometrischer Eingaben gewährleisten zu können, unterscheidet sich der Modellieransatz jedoch von dem vorheriger Modelle: Auf der Grundlage einer geschätzten Spantarealkurve (SAC), einschließlich einer abgeschätzten Hauptspantfläche, der Länge des parallelen Mittelteils sowie einer vermuteten Form der Konstruktionswasserlinie (DWL) wird eine Reihe von Spanten erstellt, um die Geometrie zu approximieren. Alle Kurven können in dieser Phase sukzessive durch Kurven ersetzt werden, die denen des tatsächlichen Schiffs näherkommen oder entsprechen, sobald genauere Daten zur Verfügung stehen. Etwaige Spanten dienen dann dazu, die Grundkurven des parametrischen Modells (Spantarealkurve, Konstruktionswasserlinie, Tangentialkurven usw.) mit Hilfe von Näherungen und Optimierungen anzupassen. Dieser Modellieransatz wurde im Rahmen des Teilvorhabens erstmals erforscht. Er hat sich als flexibel und robust erwiesen.

Die Level 1 Geometrie des SAL Heavy Lift Carriers (Bild 19) basiert ausschließlich auf öffentlich zugänglichen Informationen, siehe https://sal-heavylift.com//downloads/82ef107f-a4f9-464e-aba0-53069a7e38df.

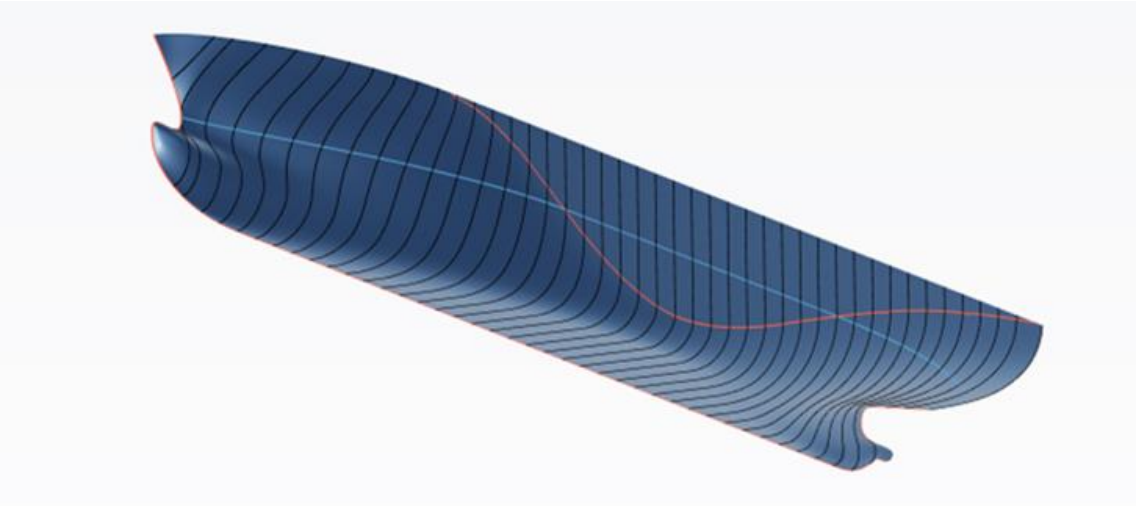


Bild 19: Level 1 Modell des SAL Heavy Lift Carriers

Ein Vergleich der Hydrostatik (Tabelle 3) zeigt, dass das Level 1 Modell nahe an den Daten der Originalgeometrie liegt.

Tabelle 3: Vergleich Hydrostatik Level 1 Modell und Originalgeometrie des SAL Heavy Lift Carriers

	Input (nach Datenblatt)	Originalgeometrie	Level 1 Modell
Verdrängung [m^3]	(21400t displacement) 20878	20576	20874
LCB [m]	-	70.39	72.79
KB [m]	-	4.96	4.96
LCF [m]	-	65.58	65.41

Eine genauere Betrachtung der Originalgeometrie (rot) und der Geometrie des Level 1 Modells (schwarz), siehe Bild 20, zeigt, dass das Original über deutlich ausgeprägte V-Spanten im Vor- und Hinterschiff verfügt. Das Level 1 Modell hat dagegen deutlich rundere U-Spanten, was einem moderneren Design entspricht. Allerdings ist zu bedenken, dass das Schiff als Heavy Lift Carrier besonderen Herausforderungen hinsichtlich der Stabilität ausgesetzt ist. Dies wäre durch Anpassung der Konstruktionswasserlinie oder einzelner Spanten adressierbar, sobald höherwertige Informationen Berücksichtigung finden (Level 2 Modell).

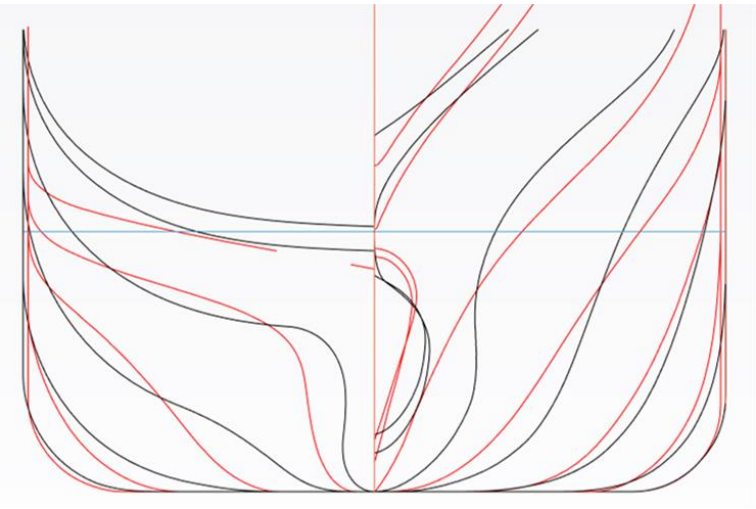


Bild 20: Originalgeometrie (rot) vs. Geometrie des Level 1 Modells (schwarz) für den SAL Heavy Lift Carriers

WebApp

Das Parametermodell für Tanker wurde als Webanwendung zur Verfügung gestellt, siehe Bilder 21, 22 und 23. Die WebApp verwendet die im Rahmen des Projekts weiterentwickelte Template-Funktionalität von CAESES und wird von FRIENDSHIP SYSTEMS gehostet.

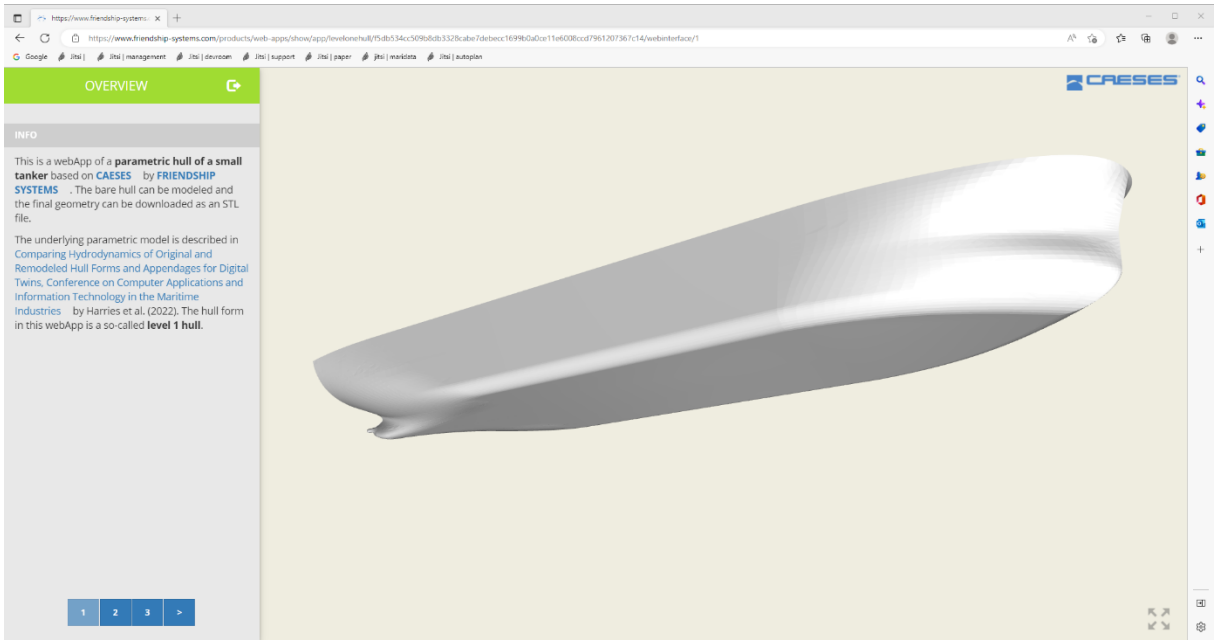


Bild 21: *Startbildschirm der WebApp zur schnellen Rumpfmodellierung*

Die WebApp bietet nur die Eingabeparameter für die Level 1 Variante des Parametermodells an. Dies ist im Sinne der WebApp-Nutzung, bei der ein Benutzer mit möglichst wenig Eingaben eine komplexe Geometrie erhalten soll.

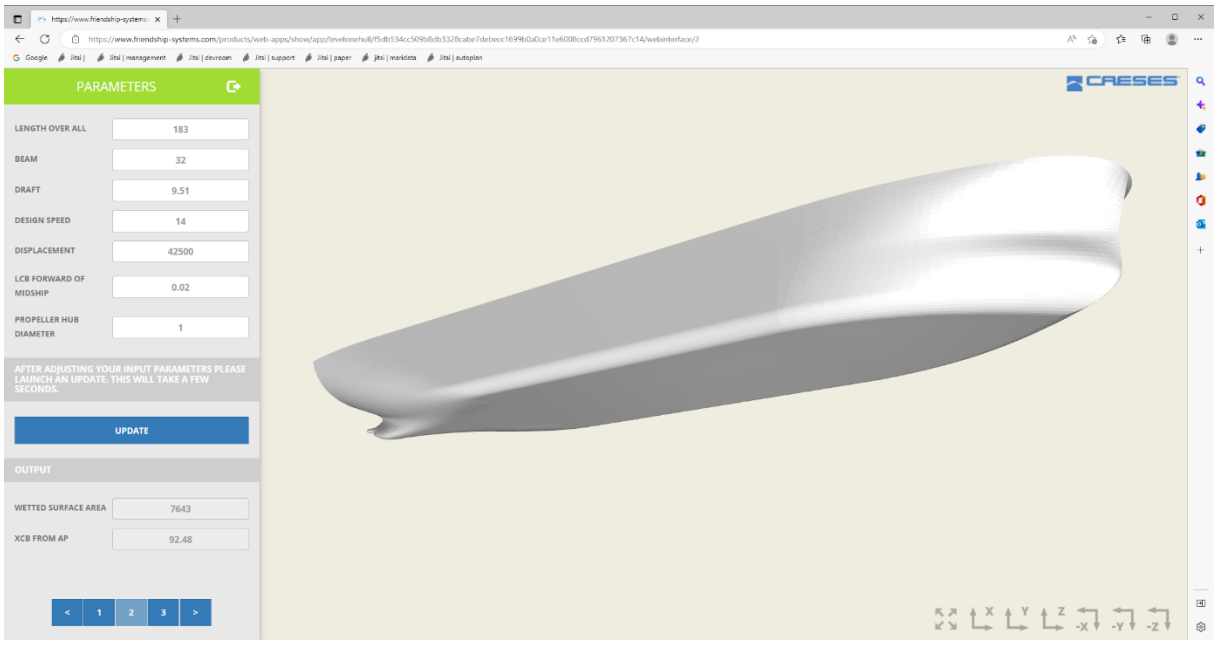


Bild 22: Eingabemaske für Level 1 Geometrie

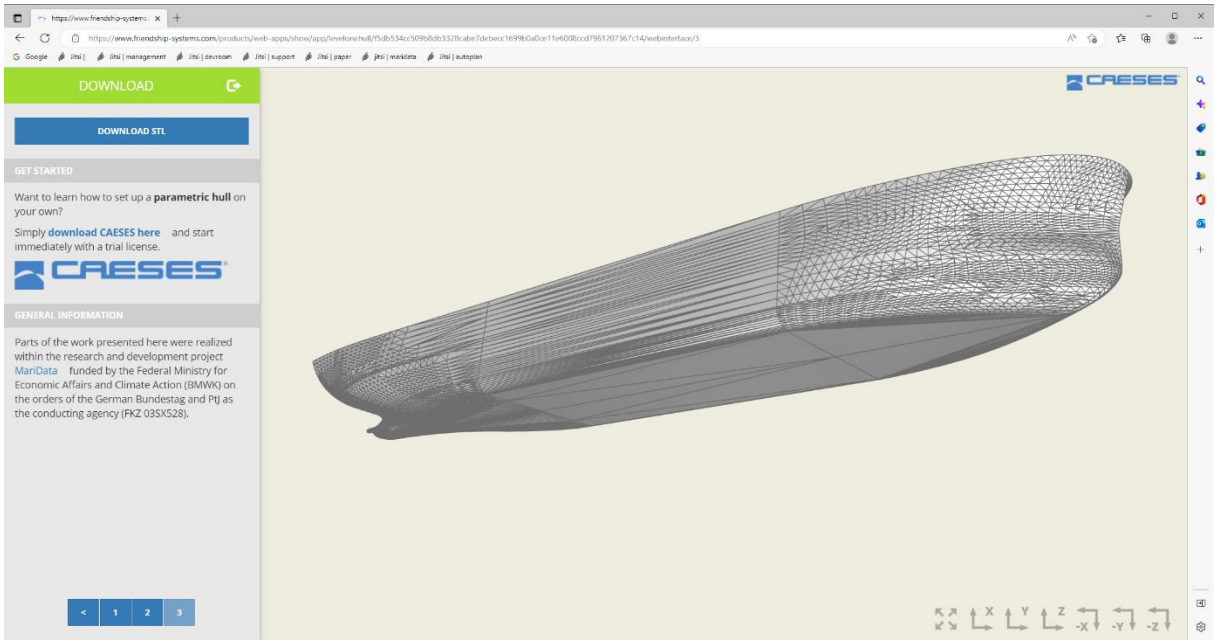


Bild 23: Maske für den möglichen Download des Level 1-Rumpfs im STL-Format

Die erstellte Geometrie kann als STL-Datei heruntergeladen und somit für anschließende Analysen, z.B. auch für CFD-Simulationen, genutzt werden. Durch die WebApp ist es möglich eine wasserdichte Schiffsgeometrie, zu den eigenen Hauptabmessungen passend, innerhalb von einer Minute zu erhalten. Die Generierung der Geometrie erfolgt dabei in wenigen Sekunden, nachdem die essentiellen Schiffsdaten, siehe Bild 22, eingetragen wurden.

Die WebApp wurde auf der HIPER (High-Performance Marine Vehicles) 2022 einer breiteren Masse von Experten aus der Schiffsindustrie vorgestellt, siehe *Hauschulz et al. (2022)*.

Feature-basierte Rumpfänderung

Mit Hilfe der CAESES-Feature Technologie können Rumpfformen fundamental geändert werden. Beispiele hierfür sind der nachträgliche Anbau eines Bugwulsts sowie die Änderung der eigentlichen Wulstgeometrie, der Anbau eines oder zweier Skegs an einen Rumpf mit offener Propellerwelle im Hinterschiff. Im Rahmen des Projekts wurden daher Features für generische Bulgwulst und Skeggeometrien entwickelt, um leicht unterschiedliche Geometrietypen zu untersuchen – auch um später mögliche Retrofits zu modellieren. Bild 24 zeigt den Output eines neuen Bugwulstfeatures und Bild 25 einen Ausschnitt der dazugehörigen Feature Definition. Zu sehen sind die Zeilen, in denen die MetaSurface und die dazugehörige CurveEngine definiert werden.

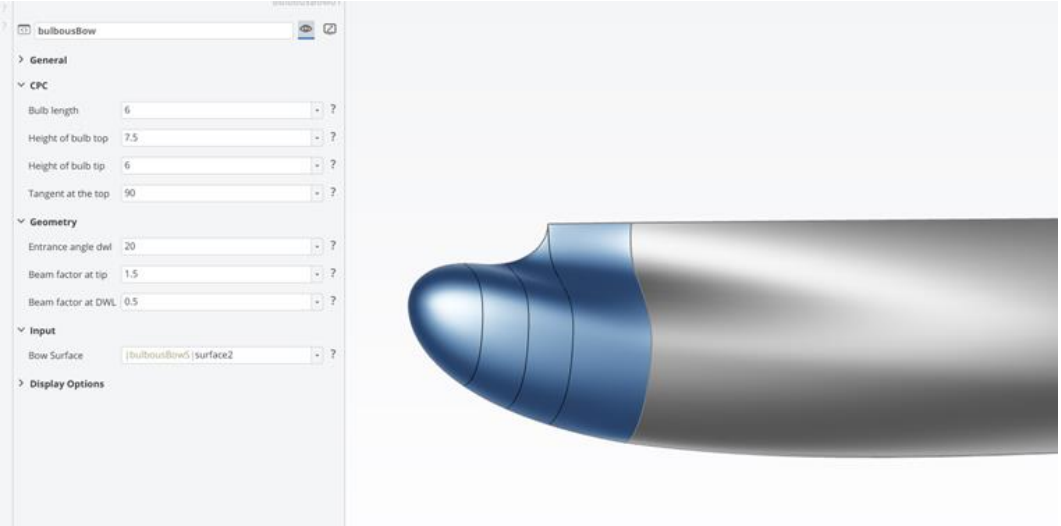


Bild 24: Feature zur schnellen Modellierung eines Bugwulsts (und etwaiger Anpassungen)

Bild 25: Ausschnitt der Feature Definition – abgebildet: CurveEngine und MetaSurface

In den Bildern 26 bis 28 wird darüber hinaus die Modellierung eines parametrischen Twinskeg illustriert. Die beiden Gondeln des Twinskegs bestehen aus jeweils zwei Teilen (einer Innen- und einer Außenseite). Die Innen- und Außenseite werden hier auf dieselbe Weise modelliert. Die Form der beiden Seiten kann jedoch unabhängig voneinander variiert werden. Ausganspunkt der Modellierung einer Seite einer Twinskeg-Gondel sind neun Designkurven (siehe Bild 26):

- Stern Valley [rot]
- Bodenkurve [grün]
- Zwei Kurven, die den Übergang zum Propeller definieren [blau]
- Drei Kurven, die die Form des Skegs kontrollieren [orange]
- Zwei Kurven, die die Kontur auf dem Hinterschiff und den Übergang von Gondel zu Hinterschiff bestimmen

Bild 26: Designkurven für die Oberfläche einer Gondelseite

Die Oberfläche der Seiten der Twinskeg-Gondel wird mittels einer MetaSurface (spezielle CAESES-Funktionalität) aufgebaut (siehe Bild 27). Für die Erstellung der MetaSurface werden B-Splines aufgespannt, deren Kontrollpunkte auf den blauen, orangenen und lilafarbenen Designkurven liegen.

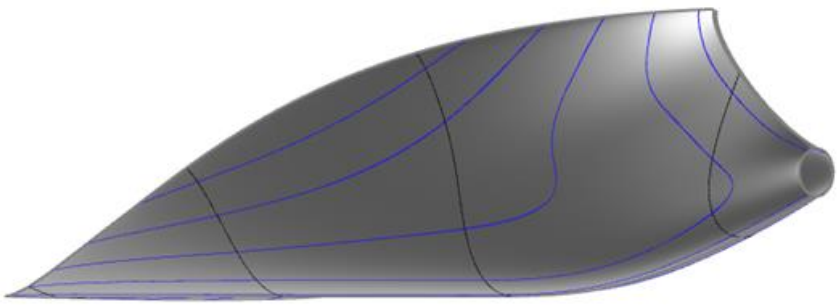


Bild 27: MetaSurface einer Twinskeg-Gondel

Das neue parametrische Modell erlaubt neben einer Änderung globaler Parameter, wie Länge und Breite des Skegs, auch das Anpassen von spezifischen Merkmalen eines Twinskegs, etwa das Drehen der Antriebsachse sowie das Drehen der gesamten Gondel um diese Antriebsachse. In Bild 28 ist beispielhaft die Variation des Verdrehungswinkels um die Antriebsachse dargestellt.

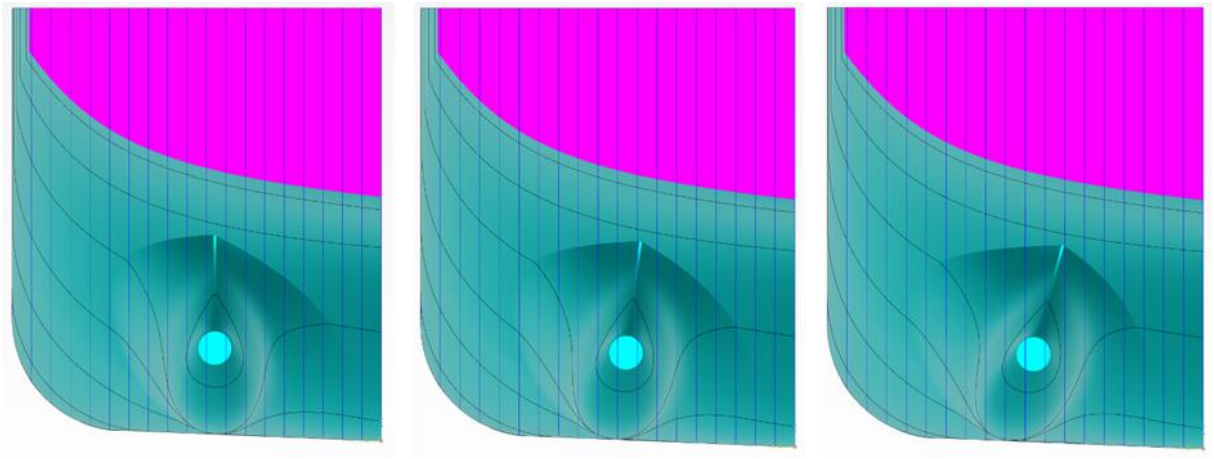


Bild 28: Variation des Verdrehungswinkels um die Antriebsachse

Ersatzmodelle

Die Ersatzmodelle, die die Grundlage des DSS bilden, wurden entweder basierend auf den durch die Hydrodynamikpartnern gelieferten Daten durch FRIENDSHIP SYSTEMS erstellt oder direkt als fertige Modelle bereitgestellt und mussten nur noch von FRIENDSHIP SYSTEMS auf dem im Rahmen der Projektarbeit realisierten API-Server zur Verfügung gestellt werden.

Zur Unterstützung der Projektpartner bei der Generierung der Ersatzmodelle wurden mehrere virtuelle Trainings von FRIENDSHIP SYSTEMS angeboten, in welchen u.a. verschiedene Sampling-Verfahren vorgestellt wurden. Im ersten Training wurde die Nutzung von CAESES zur Ersatzmodellerstellung vorgeführt und verschiedene Erstellungsverfahren, z.B. Kriging, erläutert. Da es bei den ersten erstellten Modellen zu einem unerwarteten Verhalten kam, wurden alternative Lösungen erforscht und in einem zweiten Training vorgestellt.

Das unerwartete Verhalten der Ersatzmodelle ist beispielhaft in Bild 29 dargestellt. Das Bild zeigt das Ersatzmodell (graue Fläche) des Beiwertes des Zusatzwiderstands aufgrund von Flachwassereinflüssen (deltaCt) für den Carl Büttner Tanker (CBT) dargestellt. Die Daten rühren von den RANS-Simulationen des Partners DST, der den Flachwassereinfluss im Rahmen des Verbundprojekts betrachtet.

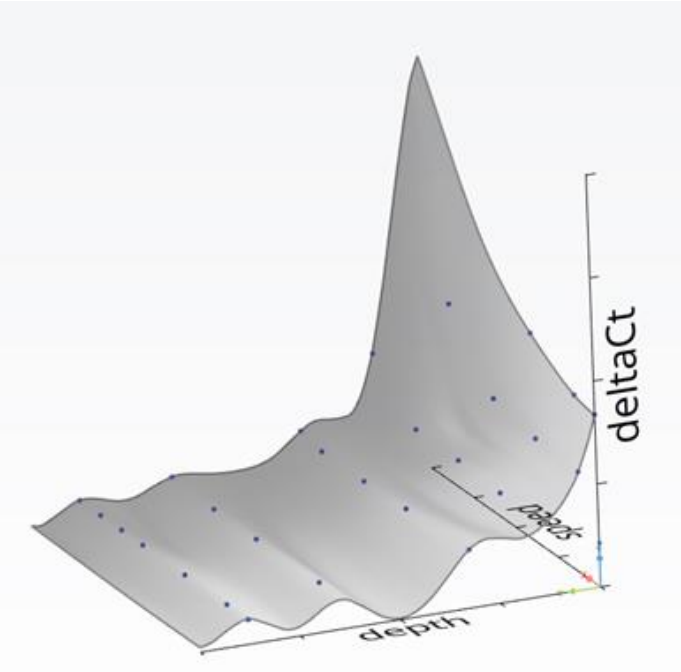


Bild 29: Illustration eines Ersatzmodells (graue Fläche), das mittels der Daten aus einer systematischen Versuchsmatrix (blaue Punkte) erzeugt wurde

Das Modell besitzt drei Eingabeparameter: Die Schiffsgeschwindigkeit (speed), den Tiefgang und die Wassertiefe (depth). Bild 28 zeigt das Ersatzmodell für einen bestimmten Tiefgang. Für die Generierung der Datenpunkte (blau) wurde eine klassische Versuchsmatrix verwendet, in welcher in der Regel alle möglichen Kombinationen der zu untersuchenden Parameter (hier: Schiffsgeschwindigkeit, Tiefgang und Wassertiefe) in einem festen Raster enthalten sind. (Dies entspricht der Praxis im Modellversuchswesen.) Für den Aufbau des Ersatzmodells wurde innerhalb von CAESES eine Kriging-Methode eingesetzt. Wie beim Kriging üblich, werden die Eingabedaten zwar exakt getroffen, aber zwischen den Datenpunkten spiegelt das Ersatzmodell nicht das hydrodynamische Verhalten des Beispielschiffes wider, sondern oszilliert.

Um die Oszillationen zu vermeiden, wurden zwei Lösungen in Betracht gezogen, zum einen die Verwendung anderer Methoden zur Erstellung von Surrogates und zum anderen der Einsatz besserer Methoden zur Population des Parameterraums (Sampling). Da der Einsatz neuer Sampling-Methoden mit der Durchführung weiterer Simulationen verbunden ist, wurden zunächst alternative Erstellungsmethoden wie Artificial Neural Networks (ANN) und polynomiale Regression in CAESES bereitgestellt und dann eingesetzt. Diese führten jedoch nicht zu spürbar besseren Ergebnissen. Folglich wurden alternative Sampling-Methoden getestet, und zwar die pseudo-zufällige Sobol-Sequenz und ein adaptives Sampling. Eine beispielhafte Verteilung von Varianten (Sampling-Punkte), die mit einem Sobol-Algorithmus erzeugt wurden, ist in Bild 30 dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass es sich nicht um eine systematische Verteilung wie bei einer klassischen Versuchsmatrix handelt.

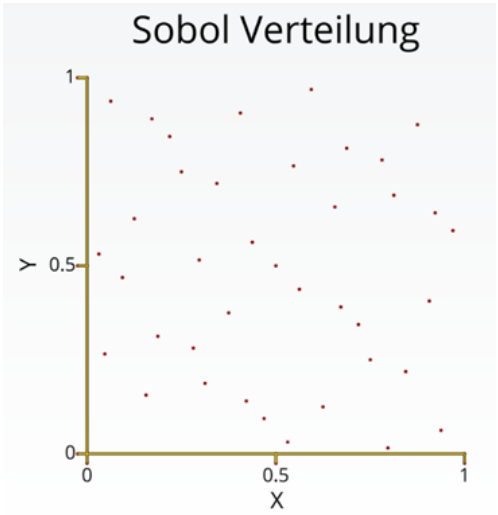


Bild 30: Verteilung von Sampling-Punkten des Sobol-Algorithmus

In Bild 31 ist ein Vergleich zwischen dem Ersatzmodell auf Basis der Daten einer systematischen Versuchsmatrix (blaue Fläche) und einem Ersatzmodell, das mit Daten aus dem Sobol-Algorithmus erstellt wurde (graue Fläche), dargestellt. Durch Sampling mittels des Sobol-Algorithmus wird ein Oszillieren vermieden und das zu erwartende Verhalten des Widerstandbeiwertes deutlich besser wiedergegeben. Dies stellt eine wichtige Erkenntnis dar, die im Rahmen des Verbundprojekts, erarbeitet werden konnte.

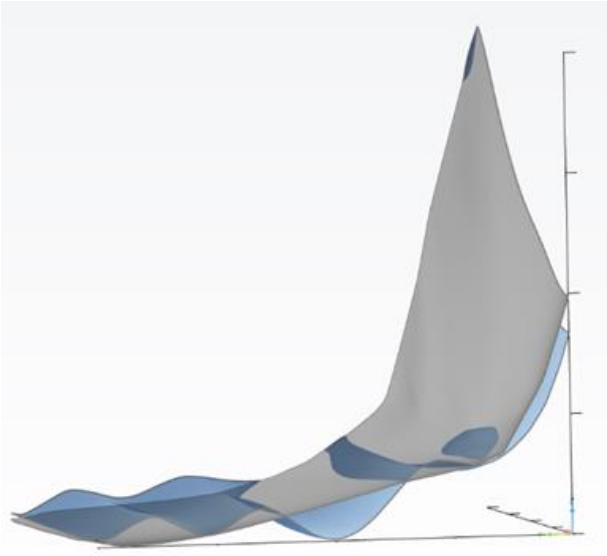


Bild 31: Vergleich von Ersatzmodellen auf Basis unterschiedlicher Eingabedaten (blau: systematische Versuchsmatrix, grau: quasi-random Sobol Sequenz)

AP3: Analyse von Treibstoffverbräuchen und Zuordnung von Ursachen

Dieses Arbeitspaket konzentrierte sich auf die Analyse des Treibstoffverbrauchs der Referenzschiffe, insbesondere des CBT. Es wurden mehrere Simulationsmethoden entwickelt, um den Energieverbrauch unter verschiedenen Bedingungen zu berechnen. Dabei lag der Fokus auf der Analyse von Einflussfaktoren wie dem Trimm, der Last und den Umwelteinflüssen. Simulationsverfahren wie die Streifenmethode und die SNNM-Methode wurden angewendet, um den Zusatzwiderstand im Seegang zu berechnen.

Die Ergebnisse zeigten, dass bereits einfache Modelle (Level 1) überraschend präzise Vorhersagen für den Treibstoffverbrauch bei Entwurfstiefgang machen konnten. Allerdings wurden deutliche Abweichungen bei anderen Betriebsbedingungen, wie dem Ballasttiefgang, festgestellt. Diese Beobachtungen führten zur Entwicklung genauerer Modelle, die auf zusätzlichen Eingangsdaten basieren.

Wie schon das Zusammenführen der hydrodynamischen Ersatzmodelle findet die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs nicht, wie zu Beginn des Projektes geplant, in CAESES statt, sondern in dem von der TUHH entwickelten Python-basierten Prognoseprogramm. Im Projekt stellte sich heraus, dass der Kommunikations-Overhead durch die Nutzung der REST API bei der iterativen Bestimmung von Parametern wie dem Betriebspunkt eines Propellers zu erheblichen Performance-Einbußen führte. Dieser iterative Prozess erfordert eine hohe Anzahl an Abfragen, da für jeden Schritt neue Eingabewerte übermittelt und Ergebnisse abgerufen werden müssen. Die kontinuierliche Kommunikation zwischen Client und Server führte dabei zu unnötigen Verzögerungen, die die Gesamtberechnung ineffizient machten. Um dieses Problem zu lösen, wurde gemeinsam mit den Partnern entschieden, die Auswertung der Surrogat-Modelle lokal durchzuführen.

Die lokale Evaluierung reduziert nicht nur die Abhängigkeit von externen Schnittstellen, sondern ermöglicht auch eine signifikant schnellere Verarbeitung der erforderlichen Berechnungen. Um dies zu erreichen, wurde die Technische Universität Hamburg (TUHH) in der Implementierung der SMT-Toolbox in Python unterstützt, da diese Toolbox qualitativ hochwertige Modelle zur Verfügung stellt, die den Anforderungen des Projekts gerecht werden. Die SMT-Toolbox (Surrogate Modeling Toolbox) bietet eine Vielzahl moderner Algorithmen und Werkzeuge zur Erstellung, Validierung und Nutzung von Surrogat-Modellen, die sich hervorragend für lokale Berechnungen eignen.

Zusätzlich wurden andere Projektpartner aktiv bei der Aktualisierung und Optimierung ihrer Modelle unterstützt, um die Interoperabilität mit der SMT-Toolbox zu gewährleisten. Dies umfasste sowohl die Anpassung von Modellformaten als auch die Validierung der Modelle, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse konsistent und präzise bleiben. Die Entscheidung für die SMT-Toolbox brachte nicht nur eine deutliche Performancesteigerung, sondern auch eine höhere Modellqualität mit sich, da diese Toolbox fortschrittliche Algorithmen nutzt, um komplexe Zusammenhänge akkurat abzubilden. Dadurch konnte der iterative Prozess der Betriebspunktbestimmung erheblich beschleunigt werden, ohne Abstriche bei der Genauigkeit der Berechnungen hinnehmen zu müssen. Das Prognoseprogramm konnte zu Projektende für Tests im

Simulator und andere Untersuchungen eingesetzt werden, siehe Abschnitt zu Arbeitspaket 6.

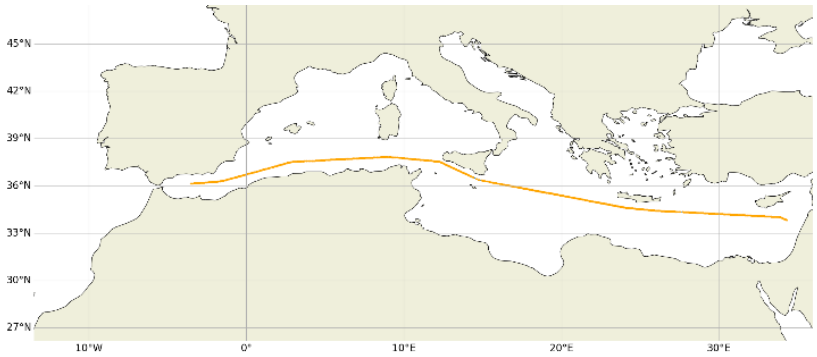
AP6: Anwendungen und Validierungen

Das sechste Arbeitspaket befasste sich mit der Validierung der entwickelten Modelle und deren Anwendungen im Schiffsbetrieb. FRIENDSHIP SYSTEMS arbeitete hier eng mit Partnern wie der TUHH, 52N und der Universität zu Lübeck zusammen, um die Modelle unter simulierten Bedingungen zu testen. Es wurden mehrere Szenarien durchgespielt, um die Genauigkeit der Modelle zu überprüfen und ihre Anwendbarkeit im realen Betrieb zu demonstrieren.

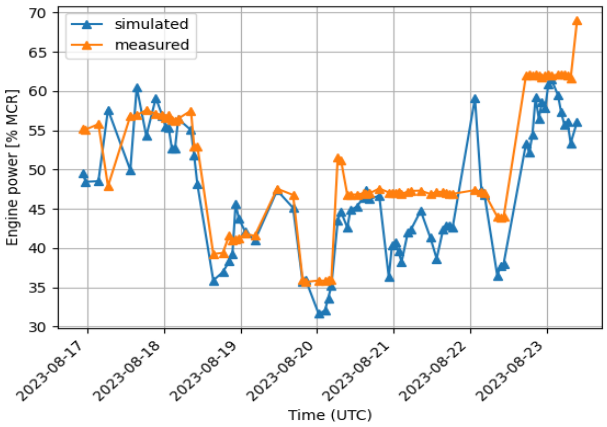
Ein bedeutendes Ergebnis war die erfolgreiche Validierung der Modelle durch die Simulation realer Betriebsbedingungen. Insbesondere die Verwendung von parametrischen Modellen in Verbindung mit CFD-Simulationen ermöglichte präzise Vorhersagen über die Leistungsanforderungen und den Treibstoffverbrauch unter verschiedenen Bedingungen.

Auf Basis der an Bord über etwa sechs Monate auf einem der Referenzschiffe – einem Tanker des Partners Carl Büttner Shipmanagement (CBT) – gemessenen Daten wurden gemeinsam mit der TUHH, 52N und der HSVA systematische Vergleiche zwischen Simulationen und Messungen begonnen. Hierbei lag und liegt der Fokus auf der Identifikation, welche Simulationsdaten wie zum Energieverbrauch beitragen, welche Einflüsse und etwaigen Fehler einzelne Modelle aufweisen und wie ein geeigneter Mix aus physikalischen Modellen (white box, dargestellt als grüne Boxen in Bild 2) und Fehlerkorrekturen (black box, dargestellt als schwarze Box namens Corrector in Bild 2) aussehen könnte. Hieraus ist eine umfangreiche Veröffentlichung auf der IMDC 2024 entstanden, siehe *Marzi, Harries et al. (2024)*.

Das entwickelte Weather Routing Tool des DSS wurde im Zusammenhang dieser Veröffentlichung für reale Bedingungen getestet. Zwei Routen wurden betrachtet, von denen hier beispielhaft die Studie für die Route im Mittelmeer vorgestellt wird (Bild 32 (A)).



(A) reale Schiffsroute des CBT



(B) Gemessene und vorhergesagte Antriebsleistung

Bild 32: Vergleich von historischen Betriebsdaten und Vorhersagen

Ein Vergleich der gemessenen Antriebsleistung und der Antriebsleistung, die von den Ersatzmodellen vorhergesagten wurde, zeigt, dass generelle Übereinstimmung der Trends vorliegt, jedoch der Standardfehler bei 6,5% liegt (siehe Bild 32 (B)). Eine Erklärung für die Ungenauigkeit könnten fehlerhafte Messdaten auf der historischen Route, zum Beispiel die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser oder die Antriebsleistung, sein oder Effekte, die durch die Ersatzmodelle zurzeit nicht genau genug abgebildet werden, etwa gegenseitige Einflüsse von Komponenten, die bei der aktuellen Superposition keinen Eingang finden (z.B. Veränderung des Zusatzwiderstands im Seegang aufgrund von Bewuchs). Diese Ungenauigkeit könnten in Zukunft durch den Einsatz eines Korrekturersatzmodell vermieden werden.

Außerdem wurde eine Sensitivitätsanalyse für die hydrodynamischen Ersatzmodelle durchgeführt. Es wurde die Auswirkungen von Fehlern in den Ersatzmodellen des Schiffwiderstands im Glattwasser, des Zusatzwiderstands durch Wind und des Zusatzwiderstands durch Wellen auf den Leistungsbedarf betrachtet, siehe Bild 33.

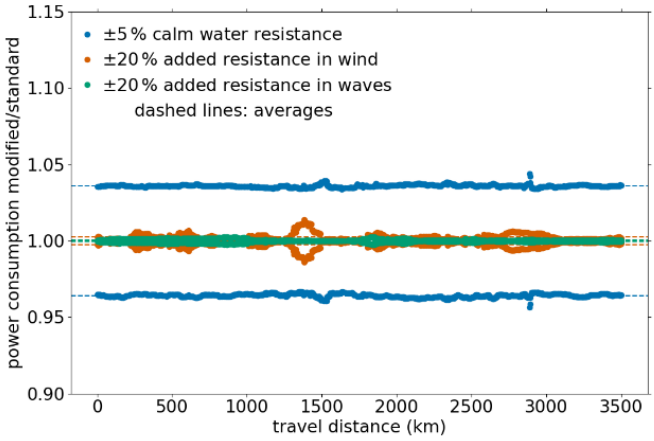
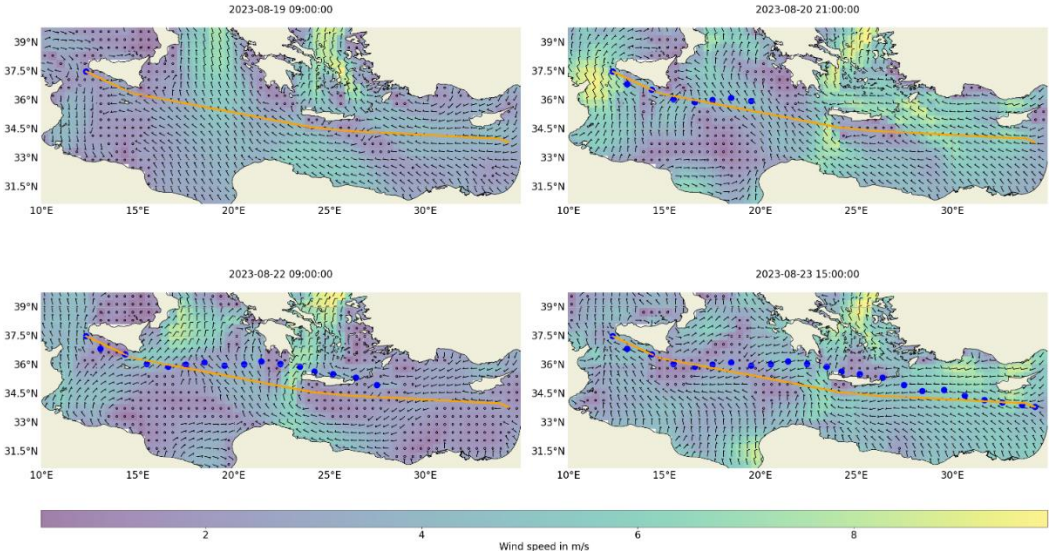


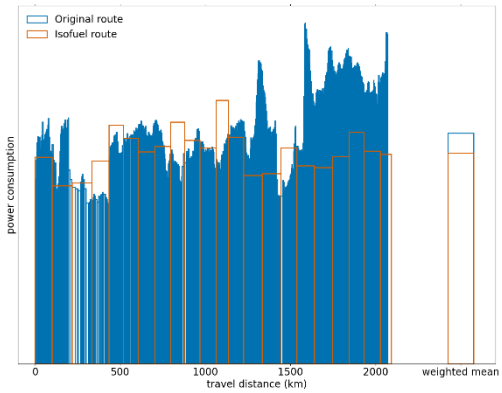
Bild 33: Vergleich des Leistungsbedarf bei variierten Widerstandskomponenten

Es ist gut zu erkennen, dass vor allem eine fehlerhafte Berechnung des Glattwasserwiderstandes zu einer ungenauen Vorhersage des Leistungsbedarf führt. Jedoch muss erwähnt werden, dass dieses Verhalten stark routenabhängig ist. Auf der zweiten Route, die gemeinsam mit den Partnern betrachtet und in *Marzi, Harries et al. (2024)* dargestellt wurde, haben die Zusatzwiderstände einen höheren Einfluss, da dort höhere Wellen und stärkere Winde auftraten. Demnach zeigen die Fehler in diesen Ersatzmodellen in diesem Fall eine größere Auswirkung auf die Leistungsprognose.

In einem weiteren Schritt wurde eine optimierte Route basierend auf historischen Umweltdaten berechnet. Die optimierte Route unterscheidet sich deutlich von der realen Route, siehe Bild 34(A). Während bei der aufgezeichneten Fahrt die Insel Kreta südlich umfahren wurde, schlägt das Ergebnis der Optimierung mittels des DSS eine Umfahrung auf der nördlichen Seite vor.



(A) Trajektorie der historischen und optimierten Route



(B) Vergleich des Energiebedarfs von historischer und optimiertet Route

Bild 34: Vergleich der historischen und optimierten Route

Diese Routenänderung wirkt sich zwar nicht auf die Fahrzeit aus – die beiden Ankunftszeiten liegen weniger als eine Stunde auseinander –, aber auf den Leistungsbedarf, sie Bild 34(B). Für die Mittelmeerroute konnte der Leistungsbedarf um 8,7% gesenkt werden.

Als Letztes wurde bei der zweiten betrachteten Route, im Golf von Biskaya, die Sensitivitätsanalyse auf die Routenoptimierung ausgeweitet, siehe Bild 35. Der Zusatzwiderstand durch Wind wurde variiert, was zu verschiedenen Ergebnissen der Optimierung führt. Die Ergebnisse verdeutlichen, wie wichtig genaue Ersatzmodelle für die hydrodynamischen Komponenten sind, um eine optimale Route vorhersagen zu können. Dies beginnt mit der genauen Remodellierung der Schiffsgeometrie, gefolgt von exakten Simulationsmethoden für die hydrodynamischen Kräfte und letztendlich ausreichend genauen Ersatzmodellen, die durch genügend Datenpunkte erstellt wurden.

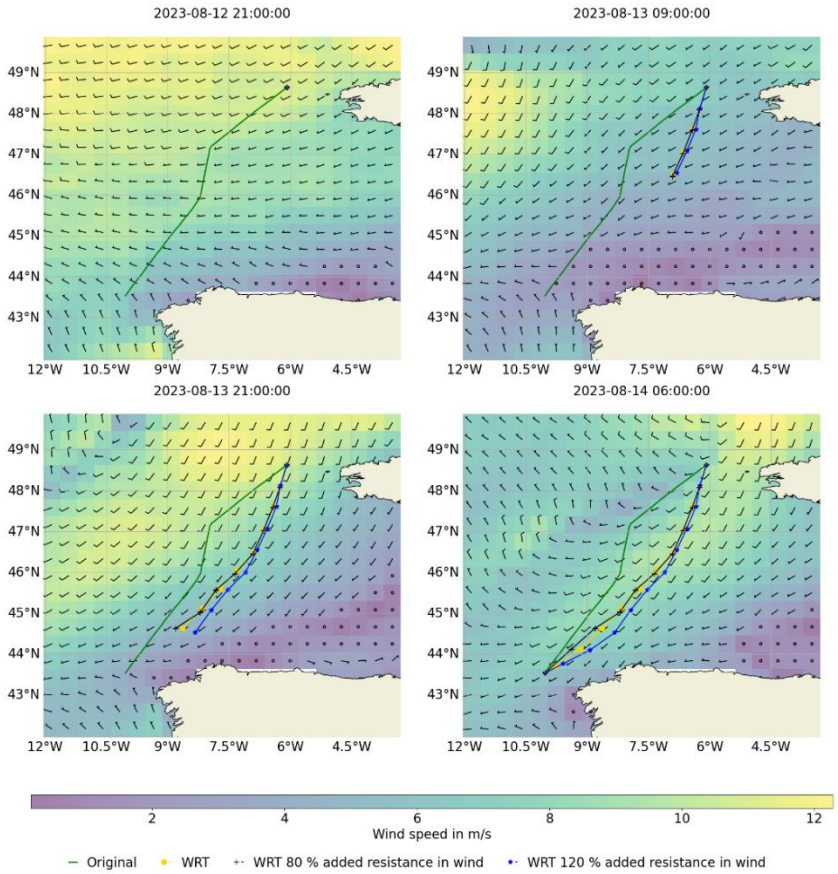


Bild 35: Optimierte Routen für +-20% Zusatzwiderstand durch Wind

Die in Bild 33 erkennbaren Veränderungen des Leistungsbedarfs aufgrund „synthetisch“ angenommener Widerstandserhöhungen bzw. -verkleinerungen deuten darauf hin, dass insbesondere eine ungenaue Darstellung der Rumpfgeometrie und somit ein Fehler im vorhergesagten Glattwasserwiderstand die Prognosegenauigkeit in fast gleicher Höhe beeinflussen. Hierdurch werden Routingvorschläge beeinflusst, vgl. auch Bild 35, und zu erwartende Reduktionen der Einsparungen an Treibstoff und Emissionen möglicherweise zu ungenau vorhergesagt. Umgekehrt formuliert lassen diese Ergebnisse vermuten, dass Routingsysteme, sofern sie vor allem mit generischen, also nicht schiffsspezifischen Daten, gespeist werden (etwa einfache Abschätzungen von Widerständen auf Basis von Level 1, siehe Tabelle 2), nicht zu vernachlässigenden Ungenauigkeiten beinhalten.

2. Verwendung der Zuwendung und wichtigste Kostenpositionen

Den größten Anteil der Kosten machen Personalkosten aus, die bei der Entwicklung der parametrischen Modelle, dem Erstellen der Surrogate Modelle, der Entwicklung der Schnittstellen des DSS und der intensiven Zusammenarbeit mit den Partnern bei der Gestaltung und dem Einsatz des DSS entstanden sind. Einen geringen Anteil haben Reisekosten für das Teilnehmen an Projekttreffen und an Konferenzen zum Präsentieren der im Projekt erarbeiteten Veröffentlichungen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die von FRIENDSHIP SYSTEMS durchgeführten Arbeiten entsprachen im Wesentlichen der im Teilantrag formulierten Planung und waren notwendig für den Erfolg des Verbundvorhabens. Die durchgeführten Arbeiten wurden von allen Projektpartnern als angemessen und für den Erfolg des Gesamtprojekts notwendig erachtet. Ohne die Zusammenarbeit mit den Partnern im Rahmen des Verbundprojekts hätte FRIENDSHIP SYSTEMS nicht die notwendigen Inputs erhalten, um die eigenen Arbeiten durchzuführen. Ohne die finanzielle Förderung wäre es nicht möglich gewesen, in Umfang und Tiefe die Themen des Teilprojekts zu bearbeiten oder im Rahmen des Verbundprojekts das Konzept und eine erste Realisierung des DSS zu erforschen.

4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Teilvorhaben *GeometricTwins* erarbeiteten Ergebnisse einen hohen technischen Nutzen auf.

Das entwickelte vollparametrische Schiffsmodell zur Modellierung von Schiffen basierend auf der vorhanden Datenlage – von „nur die Hauptabmessungen sind bekannt“ bis „jegliche Zeichnungen liegen vor und ein 3D-Scan des Rumpfes ist vorhanden“ – kann für Kunden sowohl im Softwaregeschäft als auch in Dienstleistungsangeboten der FRIENDSHIP SYSTEMS AG verwendet werden. Hinzu kommt, dass eine Variante des Modells als Web-Anwendung veröffentlicht werden kann, was konzeptionell eine neue Kundengruppe erschließt (Reeder, Betreiber, Retrofit-interessierte Werften und/oder Ingenieurbüros).

Die existierenden Web-Anwendungen sind zum jetzigen Zeitpunkt für den Benutzer noch kostenfrei. Die Kommerzialisierung ist jedoch in naher Zukunft angedacht und soll sich zu einem zusätzlichen Geschäftsfeld für FRIENDSHIP SYSTEMS entwickeln. Hierfür wurden nach Projektende noch weitere Arbeiten begonnen, die eine Skalierbarkeit von Web-Anwendungen unterstützt. Auch das vollparametrische Modell wird aktiv weiterentwickelt, um die Robustheit weiter zu erhöhen.

Der Umgang mit Surrogate Modellen und die Erweiterung um zusätzliche Funktionalität in CAESES während des Projekts hat die Kompetenzen im Team gestärkt, welche in künftigen Forschungs- und Kundenprojekten angewendet werden können.

Hinzu kommt, dass neue Funktionalität im sog. Maritime Release von CAESES auf Basis der Forschungsergebnisse von *GeometricTwins* aktuell umgesetzt wird, so dass zukünftig nicht nur Spezialisten, sondern auch „einfache“ Anwender der Software von den Ergebnissen profitieren. Diese wurden beispielsweise auf der CAESES User Conference im September 2024 vorgestellt bzw. angekündigt.

5. Wissenschaftlicher und technischer Fortschritt bei anderen Stellen

FRIENDSHIP SYSTEMS ist nicht bekannt, dass an anderen Stellen Verfahren zur Modellierung und Analyse existierender Schiffsgeometrien auf Basis schwankender Informationslage entwickelt wurden.

6. Veröffentlichungen

- Hauschulz, S., Harries, S., Thies, F., von Zadow, H. (2022). "Web-based Microservices for Fast Modeling and Easy Collaboration". Präsentiert auf der **HIPER 2022** in Cortona, Italien

- Harries, S., Thies, F., Hauschulz, S., Marzi, J., Gatchell, S. (2022). "Comparing Hydrodynamics of Original and Remodeled Hull Forms and Appendages for Digital Twins". Vorgestellt auf der **COMPIT 2022** in Pontignano, Italien

- Harries, S., Brunswig, J., Gatchell, S., Hauschulz, S., Schuhmacher, A., Thies, F., Marzi, J. (2023). "The Need for Sufficiently Accurate Geometrical Representations of Ship Hull Forms for Digital Twins for Performance Prediction". Präsentiert auf dem **8th International Symposium on Ship Operations Management & Economics** in Athen, Griechenland

- Marzi, J., Harries, S., Schwarz, B., Scharf, M., Demmich, K., Pontius M. (2024). "MariData – Digital Twin for Optimal Vessel Operations Impacting Ship Design". **15th International Marine Design Conference (IMDC)** in Amsterdam, Niederlande

III. Erfolgskontrolle und wissenschaftliche Bedeutung

1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Das Teilprojekt *GeometricTwins* trug wesentlich zu den Zielen des Maritimen Forschungsprogramms bei, indem es Technologien entwickelte, die den Energieverbrauch und die Emissionen in der Schifffahrt zu reduzieren helfen. Durch die Einführung digitaler Zwillinge konnte anhand eines repräsentativen Beispiels gezeigt werden, dass es möglich ist, den Schiffsbetrieb effizienter zu gestalten und die Umweltbelastung zu verringern.

2. Wissenschaftliche und technische Ergebnisse und Erfahrungen

Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse aus dem Teilprojekt *GeometricTwins* bestehen in

- Erstellung von Ersatzmodellen
    - Basierend auf Daten aus verschiedenen Sampling-Methoden
    - Nutzung verschiedener Erstellungsmethoden (e.g. Kriging, Artificial Neural Networks)
- Remodellierung existierender Geometrie
    - Erstellung von zwei flexiblen Parametermodellen für Tanker und schlanke Schiffe
    - Erstellung eines vollparametrischen Rudermodells
    - Modellierung eines vollparametrischen Tip-rake Propellers
- Datenaustausch
    - Implementierung einer REST-API
- Erstellung von WebApps
- Feature-basierte Rumpfänderungen
    - Bulb
    - Twinskeg

3. Verwertungsplan

Erfindungen, Schutzrechte, Lizenzen

Keine.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden weiterhin positiv beurteilt, insbesondere für Plug-in Lösungen. Die entwickelten Technologien werden nach Projektende weiter genutzt und in kommerzielle Produkte, aktuell CAESES, integriert. Insbesondere die digitalen Zwillinge und parametrischen Modelle werden Betreibern und Charterern als Werkzeuge zur Optimierung des Schiffsbetriebs zur Verfügung stehen. Hierzu ist geplant, technisch niedrigschwellige Angebote im Form von WebApps innerhalb von 12 bis 18 Monaten nach Projektende anzubieten.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Seitens FRIENDSHIP SYSTEMS gab es keine Arbeiten, die nicht zu einer Lösung geführt haben.

5. Präsentationsmöglichkeiten

Die Ergebnisse des Projekts umfassen mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen und Präsentationen auf internationalen Konferenzen wie der COMPIT und der IMDC.

6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Die Zeitplanung der Arbeiten von FRIENDSHIP SYSTEMS im Teilprojekt GeometricTwins wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der kostenneutralen Projektverlängerung, eingehalten. Die entstandenen Kosten gingen über die ursprünglichen Planungen hinaus; FRIENDSHIP SYSTEMS hat diesen Mehraufwand durch eigene Ressourcen finanziert.