

Dezember 2021

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Niklas Kühl, Lucian Rotter, Thomas Rung

DynAForm

**Weiterentwicklung von Praxistauglichen
Simulationsbasierten Methoden zur
Verbesserung der Leistungsfähigkeit
von Schiffen mittels Formoptimierung**

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben im Verbundvorhaben DYNAMO
(Forschungskennziffer 03SX453B)

TUHH

Technische Universität Hamburg

Abschlussbericht des Teilvorhabens

**Weiterentwicklung von Praxistauglichen
Simulationsbasierten Methoden zur Verbesserung der
Leistungsfähigkeit von Schiffen mittels Formoptimierung
DynAForm**

N. Kühl, L. Rotter, T. Rung

Forschungskennziffer:	03SX453B
-----------------------	----------

Verbundprojekt:	Dynamische Anpassung Modularer Formoptimierungsprozesse – DYNAMO
Verbundpartner:	Voith Turbo Schneider Propulsion GmbH & Co. KG, Technische Universität Hamburg-Harburg
Laufzeit:	01.07.2018 bis 30.06.2021

Teilprojekt:	Weiterentwicklung von Praxistauglichen Simulationsbasierten Methoden zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Schiffen mittels Formoptimierung – DynAForm
Forschungsstelle:	Technische Universität Hamburg-Harburg Inst. Fluidynamik und Schiffstheorie (M8) Am Schwarzenberg-Campus 4, D-21073 Hamburg
Autoren:	Niklas Kühl, Lucian Rotter, Thomas Rung

Inhaltsverzeichnis

I	Kurzdarstellung des Teilvorhabens	1
1	Ausgangsfragen und Zielsetzungen	1
2	Planung und Ablauf	2
3	Ausgangssituation und Stand der Forschung vor Projektbeginn	5
4	Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen	5
5	Publikationsliste	6
6	Konferenzpräsentationen	6
II	Eingehende Darstellung des Teilvorhabens	8
1	Praxisorientierte Modifikation der Adjungierten Analyse	8
2	Verbesserter Optimierungsprozess	14
3	Optimierung von Schiffen	17
3.1	Doppelendfähre	17
3.2	Offshore Versorgungsschiff	19
4	Weitere Beiträge	25

Teil I

Kurzdarstellung des Teilvorhabens

1 Ausgangsfragen und Zielsetzungen

Die internationale Schifffahrt ist für die Beförderung von rund 90% des Welthandels verantwortlich. Die dominierende Rolle der Schifffahrt ist auf den geringen Kraftstoffverbrauch pro Tonnenkilometer transportierter Fracht zurückzuführen. Die rund 55 Tausend in Betrieb befindlichen Handelsschiffe rücken jedoch auf Grund ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte in den Mittelpunkt vieler Optimierungsbemühungen.

Die Umweltverschmutzung im Seeverkehr sowie etwa 50% der direkten Betriebskosten der Schifffahrt hängen mit dem Kraftstoffverbrauch zusammen, welcher wiederum durch den Widerstand des Schiffes bestimmt wird. Letzterer wird weitgehend (zu etwa 75 %) durch konstante hydrodynamische Beiträge bestimmt, d. h. den Wellenwiderstand in ruhigem Wasser und den Reibungswiderstand entlang der benetzten Oberfläche. Möglichkeiten zur Verringerung dieser Widerstandsbeiträge - selbst um einige Promille -, sind sowohl aus wirtschaftlicher als auch ökologischer Sicht sehr willkommen.

Das Vorhaben befasste sich mit der Weiterentwicklung eines simulationsbasierten Prozesses für die hydrodynamische Formoptimierung von frei schwimmenden Schiffsrümpfen, die nicht mischbaren turbulente Zweiphasenströmungen ausgesetzt sind. Das Augenmerk lag auf gradientenbasierten adjungierten Methoden in einer parameterfreien Optimierungsumgebung. Der Schwerpunkt wurde auf Wellen- und Reibungswiderstand bei Froude- und Reynold-Zahlen von praktischem Interesse gelegt. Besonderes Interesse galt (I) genauen und robusten adjungierten Zweiphasen-Strömungsmodellen, einschließlich der Einbeziehung dynamischer Schwimmlageaspekten, (II) einer verbesserten CAD-freien Formparametrisierung für teilweise benetzte Formen, die Fertigungseinschränkungen unterliegen, und (III) der Anwendung des vorangegangenen zur Optimierung von Schiffen. Die Anwendungen konzentrierten sich auf ein häufig untersuchtes Containerschiff, ein stumpfes Offshore-Versorgungsschiff sowie eine Doppelendfähre. Die Ergebnisse lassen sich auf die Optimierung anderer schiffstechnischer Anwendungen übertragen, z. B. auf den Entwurf von küstennahen Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energien, die Meereswellen in der Brandungszone nahe einer freien Oberfläche nutzen.

2 Planung und Ablauf

Im Einklang mit den oben genannten Zielen war das Projekt in drei aufeinander folgenden Arbeitspakete gegliedert, die im Folgenden beschrieben werden.

I Praxisorientierte Modifikation der Adjungierten Analyse

- I.1 Cahn-Hilliard Navier-Stokes (CH-NS) Zweiphasenmodell: Herleitung, Implementierung, Verifizierung und Validierung eines primalen/dualen CH-NS Zweiphasenströmungssimulationsverfahrens.
- I.2 Schwimmlage: Einführung einer variablen Schwimmlage in die adjungierte Optimierung von frei schwimmenden Körpern.

II Verbesserter Optimierungsprozess

- II.1 Technische Nebenbedingungen: Berücksichtigung neuartiger (impliziter, volumenbasierter) Methoden für den Umgang mit geometrischen Nebenbedingungen.
- II.2 Optimierungsalgorithmen: Konvergenzbeschleunigung durch intelligentere Suchrichtungen

III Optimierung von Schiffen

III.1 Adjungierte Optimierung: der Schiffslinien unter betriebsnahen Bedingungen

Bei nicht mischbaren Zweiphasenströmungen, z. B. Luft und Wasser, vermischen sich die Fluidphasen nicht. Ein entscheidender Aspekt der Simulation besteht darin, die vorhergesagte Grenzfläche zwischen den beiden Phasen so stark wie möglich zu komprimieren, um den Phasensprung zu imitieren. Die damit zusammenhängenden primalen (physikalischen) numerischen Modelle beziehen sich auf *Downwind*-Verfahren, die eine komplexe, nicht ohne weiteres differenzierbare Kaskade von Anweisungen verwenden, welche schlussendlich zwischen *Upwind* und *Downwind* Approximationen hin und herschalten um die Stabilität des numerischen Systems zu gewährleisten. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die diskreten primalen Strömungseigenschaften im Wesentlichen mit der diskreten Konzentration springen und eine Sensitivitätsanalyse auf der Grundlage von adjungierten VoF-Methoden schwer zu realisieren ist. Aufgrund der starken Kopplung führt dieser Sprung zu numerischen Instabilitäten im adjungierten System, wenn sich die Fluideigenschaften wesentlich unterscheiden, vgl. [12]. Als Ausweg kann das duale Konzentrationsfeld mit Hilfe einer synthetischen Zähigkeit künstlich verwischt werden ([3, 12]), was streng genommen einen Bruch der dualen Konsistenz bedeutet und ein erhebliches Maß an Unsicherheit in den Prozess einbringt. Um das inhärente Problem einer scharfen Grenzflächenbehandlung in einer adjungierten Analyse zu lösen, bieten diffusive Grenzflächenmodelle einen vielversprechenden Kompromiss zwischen physikalischer Konsistenz und numerischer Stabilität. Die entsprechende Cahn-Hilliard-Navier-Stokes-Konzentrationsgleichung kann als eine Erweiterung der Standard-VoF-Technik auf eine nichtlineare partielle Differentialgleichung vierter Ordnung interpretiert werden, welche auf einem Funktional zur Minimierung der freien Energie beruht, vgl. [5]. Das Cahn-Hilliard-System kann einen kontrollierten Phasentrennungsprozess nachbilden und bietet daher im Vergleich zu den klassischen VoF-Methoden einen besser gestellten numerischen Prozess.

Eine Finite Volumen (FV) Approximation des Cahn-Hilliard VoF-Systems (CHVoF) für Zweiphasenströmungen wurde in **AP I.1** formuliert und implementiert. Mit besonderem Interesse an der erreichbaren physikalischen Konsistenz, der numerischen Stabilität und der damit verbundenen kompressiven Strömungsapproximation konvektiver Flüsse wurde der CH-VoF-Ansatz für Standard-Referenzfälle in **AP I.1** validiert. Ein großer Teil der Forschungsarbeit wurde der Verifizierung des CHVoF-Ansatzes gegenüber dem bestehenden heuristischen VoF-Ansatz von [12, 13, 14] zur Güte der vorhergesagten adjungierten Sensitivitäten gewidmet.

Dynamische Trimmung & Tauchung (T&T) ist ein Schlüsselaspekt für die Widerstandsoptimierung eines Schiffes. In früheren Untersuchungen wurden die vorhergesagten Widerstandsreduzierungen für ein festgehaltenes Schiff, d. h. eine feste Schwimmlage, grundsätzlich bestätigt. Wenn das optimierte Schiff jedoch frei schwimmt, verschwindet ein erheblicher Teil der Optimierungsergebnisse wieder. Die damit verbundenen Einflüsse beziehen sich in erster Linie auf die durch die Formveränderungen hervorgerufenen Änderungen von T&T, wobei die Trimmung besonders einflussreich ist, vgl. [35, 34]. **AP I.2** hat sich mit dem Beitrag der dynamischen Schwimmlage zum adjungierten Ansatz befasst.

Das **AP II** umfasste zwei Aspekte. Zum einen die Einführung impliziter geometrischer Nebenbedingungen in den Prozess und zum anderen die Behandlung spezifischer Probleme der Zweiphasenströmung, z.B. entlang der Wasserlinie der benetzten Geometrie. Darüber hinaus müssen bei der Aktualisierung von technischen Formen globale und lokale geometrische Beschränkungen eingehalten werden, die von der gesteuerten Form abhängen. In **AP II.1** wurden relevante geometrische Ungleichheitsbedingungen in das adjungierte Kalkül eingeführt, die das Lagrange-Funktional um zusätzliche duale Variablen erweitern. Aufgrund der exklusiven Abhängigkeit der geometrischen Ungleichungen von der Kontrolle, nicht aber vom Zustand, unterstützen Optimalitätsbedingungen erster Ordnung (vgl. [22]) die Berechnung der neuen dualen Variablen. Sie formulieren eine sog. *adjungierte Kontrolle* und erweitern den Gradienten, um die Entwicklung in unerwünschte Designraumregionen zu vermeiden. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Erhaltung der Verdrängung in **AP II.1** gewidmet. Im Rahmen des Projekts wurden Techniken untersucht, um aus der verfügbaren Formsensitivität eine Abstiegsrichtung zu erhalten. Dieser entscheidende Teil eines robusten, knotenbasierten und industrialisierten Optimierungsverfahrens hängt von der Wahl der betrachteten Oberflächenmetrik ab. Prominente Beispiele beziehen sich auf Metriken vom Typ Laplace-Beltrami (LB) oder Steklov-Poincaré (SP), vgl. [32, 8]. Es wurde ein impliziter SP-Ansatz entwickelt, welche lediglich auf der Sensitivitätsebene arbeitet und inhärent glatte Formen liefert. Der Ansatz teilt Ideen von ein Sub-Optimierungsproblem, welches darauf abzielt, das quadratische Integral des Deformationsflusses durch den benetzten Teil der durch das SP-Feld eingeschränkten Form zu minimieren. Aufgrund des impliziten volumen(feld)basierten Ansatzes führt der resultierende Gradient zu einer inhärent glatten Formaktualisierung, sogar entlang der Wasserlinie der freien Wasseroberfläche, die in **AP II.1** behandelt wurde.

Hydrodynamische Untersuchungen an Schiffen im Großausführungsmaßstab mit Reynoldszahlen über $\mathcal{O}(10^9)$ werden i.d.R. auf der Grundlage von Zwei-Parameter-RANS-Schliessungen durchgeführt und verwenden typischerweise Wandfunktionen, vgl. [38]. Kontinuierliche adjungierte Optimierungsstudien für turbulente Strömungen greifen in diesem Zusammenhang häufig auf das Konzept der *eingefrorenen Turbulenz* zurück, was bedeutet, dass keine Variation in die Richtungen der modellierten

turbulenten Größen vorgenommen wird und keine dualen Transportgleichungen für die Turbulenzgrößen entstehen. Diese Vereinfachung ist vorteilhaft für die Robustheit und reduziert die Rechenkosten pro adjungierter Simulation. Dennoch ist es eine offene Diskussion, ob und wann man ein adjungiertes Turbulenzmodell verwenden sollte oder nicht. Bisher ist darüber hinaus nicht klar, ob die Vorteile einer schnelleren Konvergenz auf Grund eines realistischen Gradienten durch den erhöhten Rechenaufwand, der mit einem größeren adjungierten System und der komplexeren Kopplung zwischen den Gleichungen verbunden ist, aufgehoben werden. Das **AP II.2** konzentrierte sich auf wandnahe Strömungsmodelle, die für die Sensitivitätsvorhersage entscheidend sind. Im Gegensatz zu früheren Studien wurde die Aufmerksamkeit auf algebraische adjungierte Strategien beschränkt, unabhängig vom primalen Turbulenzmodell. Ausgangspunkt war die Analyse einer einfachen unidirektionalen Scherströmung unter Verwendung der Prandtlischen Mischungslängenhypothese ([30, 29]), welche die Grundlage praktisch aller auf Wandfunktionen basierenden RANS-Grenzschichtbeschreibungen darstellt. Unter Verwendung von Mischungswegargumenten wurde eine einheitliche algebraische adjungierte Impulsgleichung für die Strategie der eingefrorenen Turbulenz und einem mit dem Gesetz der Wand (GdW) konsistenten (differenzierten) Ansatz hergeleitet. Die mit der GdW-konsistenten algebraischen Schließung erzielten Ergebnisse kommen ohne zusätzliche Kosten aus und zeigen eine Beschleunigung des Optimierungsprozesses sowie verbesserte optimale Lösungen. Ein versteckter Vorteil des vorgeschlagenen GdW-konsistenten Ansatzes adressiert die verbesserte Stabilität des numerischen Prozesses aufgrund einer erhöhten Zähigkeit.

Es wurden diverse vollständige Optimierungsstudien für ein Offshore-Versorgungsschiff (OSV), das Kriso-Container-Schiff (KCS) und eine Doppelendfähre (DEF) bei sowohl festem als auch variablem T&T in **AP III.1** durchgeführt.

Tabelle 1 zeigt die geschätzte Arbeitsbelastung für die oben genannten Arbeitspakete. Das Projekt entwickelte sich entsprechend dem Plan.

AP	Titel	Dauer [Monate]
1	Praxisorientierte Modifikation	16
2	Verbesserter Optimierungsprozess	16
3	Optimierung von Schiffen	16
-	Publikationen	4

Tabelle 1: Die Arbeitspakete des Projekts und die geschätzte Dauer.

3 Ausgangssituation und Stand der Forschung vor Projektbeginn

Das Projekt befasste sich mit der effizienten Optimierung für ein widerstandsarmes Design zur kostengünstigen Realisierung der Geschwindigkeitsanforderungen.

Ausgangspunkt waren bekannte, gradientengestützte Untersuchungsansätze, die entweder den Reibungswiderstandsanteil oder den Wellenwiderstandsanteil (potenzialtheoretisch) reduzieren. Darüber hinaus ist die Schwimmlageänderung für schnellverkehrende Schiffe bei hoher Froude-Zahl oftmals hydrodynamisch wichtig. Die Wechselwirkung zwischen Formänderung, Lastumverteilung und Schwimmlageänderung wurde vormals i.d.R. nicht zur Laufzeit der Optimierung berücksichtigt, sondern nur nachträglich überprüft.

In vorangegangenen Vorhaben zeigte sich, dass durch eine vereinfachte Betrachtung zur Laufzeit der Optimierung ein erheblicher (nachträglicher) Verlust der Ergebnisgüte bzw. des Ertrages auftreten kann. In einzelnen Fällen kam es (phasenweise) zu einer Trendumkehr der Optimierung. Dies motivierte eine allgemeinere, simultane Erfassung aller Widerstandsbeiträge sowie einer sich dynamisch einstellenden Schwimmlage in einem industrietauglichen, robusten und effizienten Ansatz auf der Basis adjungierter Gleichungen.

4 Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen

Da alle Projektpartner über die zur Durchführung der Arbeitspakete erforderlichen wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen verfügten, konnte auf die Mithilfe dritter Stellen außerhalb des Konsortiums verzichtet werden.

Für die projektinterne Kooperation wurde eine gemeinsame, beiden Partnern zugängliche CI/CD-Umgebung etabliert, die einen reibungslosen Transfer der Zwischenergebnisse zur gemeinsamen Nutzung während des Projekts sicherstellte.

5 Publikationsliste

Die Ergebnisse wurden in vier von Fachleuten geprüften (peer-review) Zeitschriften veröffentlicht:

- [1] N. Kühl, M. Hinze, and T. Rung. Cahn-Hilliard Navier-Stokes Simulations for Marine Free-Surface Flows. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2020. doi:10.1007/s42757-020-0101-3. (open access)
- [2] N. Kühl, P.M. Müller, and T. Rung. Continuous Adjoint Complement to the Blasius Equation. *Physics of Fluids*, 33(3):033608, 2021. doi:10.1063/5.0037779. (open access)
- [3] N. Kühl, J. Kröger, M. Siebenborn, M. Hinze, and T. Rung. Adjoint Complement to the Volume-of-Fluid Method for Immiscible Flows. *Journal of Computational Physics*, 440:110411, 2021. ISSN 0021-9991. doi:10.1016/j.jcp.2021.110411.
- [4] N. Kühl, P. M. Müller, and T. Rung. Adjoint Complement to the Universal Momentum Law of the Wall. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2021. doi:10.1007/s10494-021-00286-7. (open access)

6 Konferenzpräsentationen

Die Ergebnisse wurden auf 11 Konferenzen bzw. Workshops vorgestellt.

- [1] N. Kühl, M. Hinze, and T. Rung. Adjoint Complement to the Volume-of-Fluid Method. *Young Researchers Meeting & Computational Science and Engineering Workshop on Applied Mathematics*. Plön (GER). 2018.
- [2] N. Kühl, M. Hinze, and T. Rung. Cahn-Hilliard Phase Field Approach for Adjoint Two-Phase Fluid Dynamic Shape Optimization. *World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress*, Glasgow (UK). 2018.
- [3] N. Kühl, M. Hinze and T. Rung. A Cahn-Hilliard Navier-Stokes Method for CFL-Independent Simulations. *Young Researchers Meeting & Computational Science and Engineering Workshop on Applied Mathematics*. Plön (GER). 2019.
- [4] N. Kühl, M. Hinze, and T. Rung. A Cahn-Hilliard Navier-Stokes Method for CFL-Independent Simulations. *ECCOMAS Marine 2019 Conference on Computational Methods in Marine Engineering*. Gothenburg (SWE). 2019.
- [5] N. Kühl and T. Rung. Geometric Inequality Constraints in Continuous Adjoint-Based Shape Optimization. *EUROGEN 2019 Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control*. Guimaraes (POR). 2019.
- [6] N. Kühl, M. Siebenborn, and T. Rung. Surface Metrics and Geometrical Constraints Within CAD-Free Adjoint-Based Hydrodynamic Shape Optimization. *14th World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress*, Paris (FRA). 2020.

- [7] N. Kühl, P. M. Müller, and T. Rung. Continuous Adjoint Complement to the Blasius Equation. *91st GAMM Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics*, Kassel (GER). 2021.
- [8] T. Rung, N. Kühl and M. Hinze. Cahn-Hilliard Navier-Stokes Approaches for the Simulation of Immiscible Free-Surface Flows. *91st GAMM Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics*, Kassel (GER). 2021.
- [9] N. Kühl and T. Rung. Adjoint Complement to the Volume-of-Fluid Method for Immiscible Flows. *ECCOMAS MARINE 2021 Conference on Computational Methods in Marine Engineering*. Edingburgh (UK). 2021.
- [10] N. Kühl, P. M. Müller, and T. Rung. Aspects of Near Wall Adjoint Fluid Flow. *DFG-RTG 2583 Workshop on Modeling, Simulation and Optimization of Fluid Dynamic Application*, Digital. 2021.
- [11] T. Rung and N. Kühl. Adjoint Optimization for Marine Engineering Two-Phase Flows. *EUROGEN 2021 Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control*. Athens (GRE). 2021.

Teil II

Eingehende Darstellung des Teilvorhabens

1 Praxisorientierte Modifikation der Adjungierten Analyse

Beobachtungen während früherer Forschungen von [14] zeigen schwerwiegende Robustheitsprobleme von adjungierten VoF-Methoden mit scharfen Phasenübergängen, insbesondere bei Anwendung auf Probleme der Meerestechnik mit großen Reynolds- und Froude-Zahlen. Ähnliche Probleme wurden von [3] für Flachwassermodelle berichtet. Heuristische Adhoc-Maßnahmen zur Regularisierung der adjungierten Lösung beziehen sich auf die Aufhebung der Dualität durch Einführung eines parametrisierten Diffusionsoperators in die adjungierte Konzentrationsgleichung, vgl. [14]. Solche Maßnahmen legen nahe, eine konsistente Änderung des primalen Modells auf dem Weg der diffusen Grenzflächenmodelle einzuführen, die eine Phasentrennung unterstützen. Das Projekt betrachtete die Ableitung eines massenkonservativen diffusen Grenzflächenmodells, das Ideen eines Cahn-Hilliard (CH)-Ansatzes (vgl. [9, 1]) mit dem klassischen VoF-Rahmenwerk kombiniert und hier als CH-VoF bezeichnet wird. Diese Strategie führte anschließend zu einem konsistenten primalen/dualen Ansatz. Die wichtigsten Beiträge dieses Projekts beziehen sich auf:

1.1 Herleitung und Implementierung eines CH-VoF-Ansatzes.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Strategien unterstützt der vorliegende CH-VoF-Rahmen massenkonservative Phasenbeziehungen und führt zu einer schwach kompressiblen Formulierung. Die Formulierung entspricht einem generischen Scherströmungsbeispiel, das anschließend zur Analyse der adjungierten Formulierungen verwendet wurde (vgl. 1.5-8).

1.2 Formulierung und Validierung eines effizienten technischen CH-VoF-Verfahrens.

Im Allgemeinen ist die CH-VoF-Methode in der Lage, die Grenzflächenphysik aufzulösen. In technischen Studien ist die Grenzflächenphysik nicht von Interesse und wird nicht aufgelöst. Daher wird die unzureichend aufgelöste Grenzflächenphysik durch ein *Sub-Grid-Model* für einen Mobilitätsparameter ersetzt. Das Verfahren bietet die Möglichkeit der Nachschärfung, d.h. eine anfänglich diffuse Grenzfläche wird beim Fortschreiten der Lösung eher geschärft als verwischt, was für technische Simulationen interessant ist, bei denen es häufig zu einer sukzessiven Grenzflächenverwischung kommt.

Aufgrund der scharfen Grenzflächendarstellung macht der CH-VoF-Ansatz die Verwendung von kompressiven Konvektionsschemata überflüssig und unterstützt die Verwendung von *Upwind*-Approximationen. Im Gegensatz zu kompressiven VoF-Schemata, die auf *Downwind*-gerichteten Schemata beruhen, unterstützt der Ansatz stationäre Berechnungen und ist nicht auf kleine Courant-Zahlen in einer Pseudozeit beschränkt, wenn er entsprechend konstruiert ist.

1.3 Formulierung einer Zustandsgleichung für die Flüssigkeitseigenschaften.

Im Einklang mit analytischen Überlegungen an einem Modellproblem wurde eine nichtlineare Zustandsgleichung hergeleitet, um die Indikatorfunktion (Konzentration) mit den Fluideigenschaften in Beziehung zu setzen. Dadurch werden minimale Unschärfen der Konzentration in

nicht mischbaren Strömungen umgangen, und das resultierende System ist praktisch unempfindlich gegenüber der räumlichen Auflösung.

1.4 Validierung für meerestechnische und geophysikalische Strömungen.

Ein weiterer Vorteil des Modells besteht darin, dass es Oberflächenspannungseffekte auf natürliche Weise einbezieht, wenn die Grenzflächenphysik aufgelöst wird und daher kein zusätzliches Modell erforderlich ist, wie z.B. die Kontinuumsmethode von [4] und [20]. Daher wurde die CH-VoF Methode erfolgreich sowohl auf Schwerkraft- als auch auf kapillargetriebene Wellenfelder, wie in [31] beschrieben, angewandt.

Die Ergebnisse der primalen Zweiphasenmodellierung wurden in [16] veröffentlicht. Ein exemplarischer Validierungsfall bezog sich auf die vollturbulente Strömung um ein Kriso-Containerschiffsrumpf (KCS) ohne Anhänge. Experimentelle Widerstandsdaten und Wellenfelder sind von [11] für ein Modell im Maßstab 1:31,6 veröffentlicht, und es gibt eine Vielzahl an vergleichenden numerischen Daten, z. B. [21, 14, 12, 23, 2]. Abbildung 1 zeigt die durch den Schiffsrumpf erzeugte Wellenerhebung. Die Wellenhöhe ($x_{FS,3}/L^{PP}$), welche in drei unterschiedlichen lateralen Positionen durch die freie Oberfläche gemessen wurde, d.h. $x_2/L^{PP} = 0.0741$, $x_2/L^{PP} = 0.1509$ und $x_2/L^{PP} = 0.4224$, wird in Abb. 2 mit experimentellen Daten verglichen. Die prädiktive Diskrepanz ist im Allgemeinen gering und der nichtlineare CH-VoF Ansatz liefert tendenziell etwas größere Amplituden. Zu beachten ist, dass die nichtlineare Zustandsgleichung zu einer deutlichen Verschärfung des Dichtefeldes führt, vgl. Abb. 3.

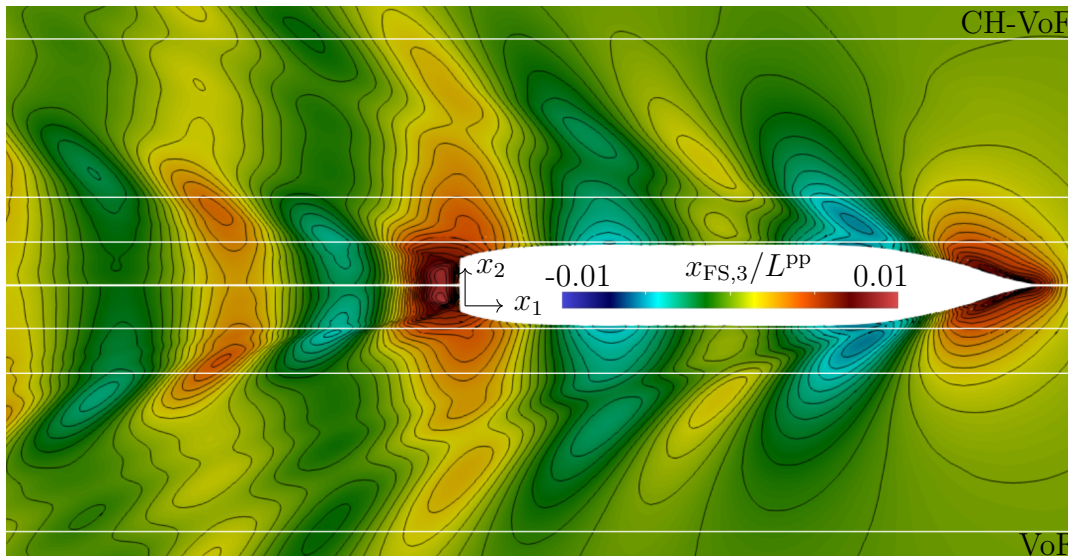


Abbildung 1: Kriso-Containerschiff ($Re = 1.4 \cdot 10^7$ und $Fn = 0.26$): Vergleich des vorhergesagten Wellenfelds, welches mit dem VoF- (unten) und CH-VoF-Ansatz (oben) bestimmt wurde. Weiße horizontale Linien kennzeichnen die Auswertungsebenen, die für die in Abb. 2 dargestellten Wellenschnitte verwendet wurden.

Ein wesentlicher Teil des Projekts analysierte das gekoppelte primale und adjungierte VoF-Modell. In [17] wird eine geschlossene analytische Lösung für ein Modellproblem vorgestellt, die zeigt, dass der adjungierte Teil schlecht gestellt zu sein scheint. Als Abhilfe wird ein zusätzlicher diffusiver Konzentrationsterm in die adjungierte Konzentrationsgleichung auf dem von [12] vorgeschlagenen Weg

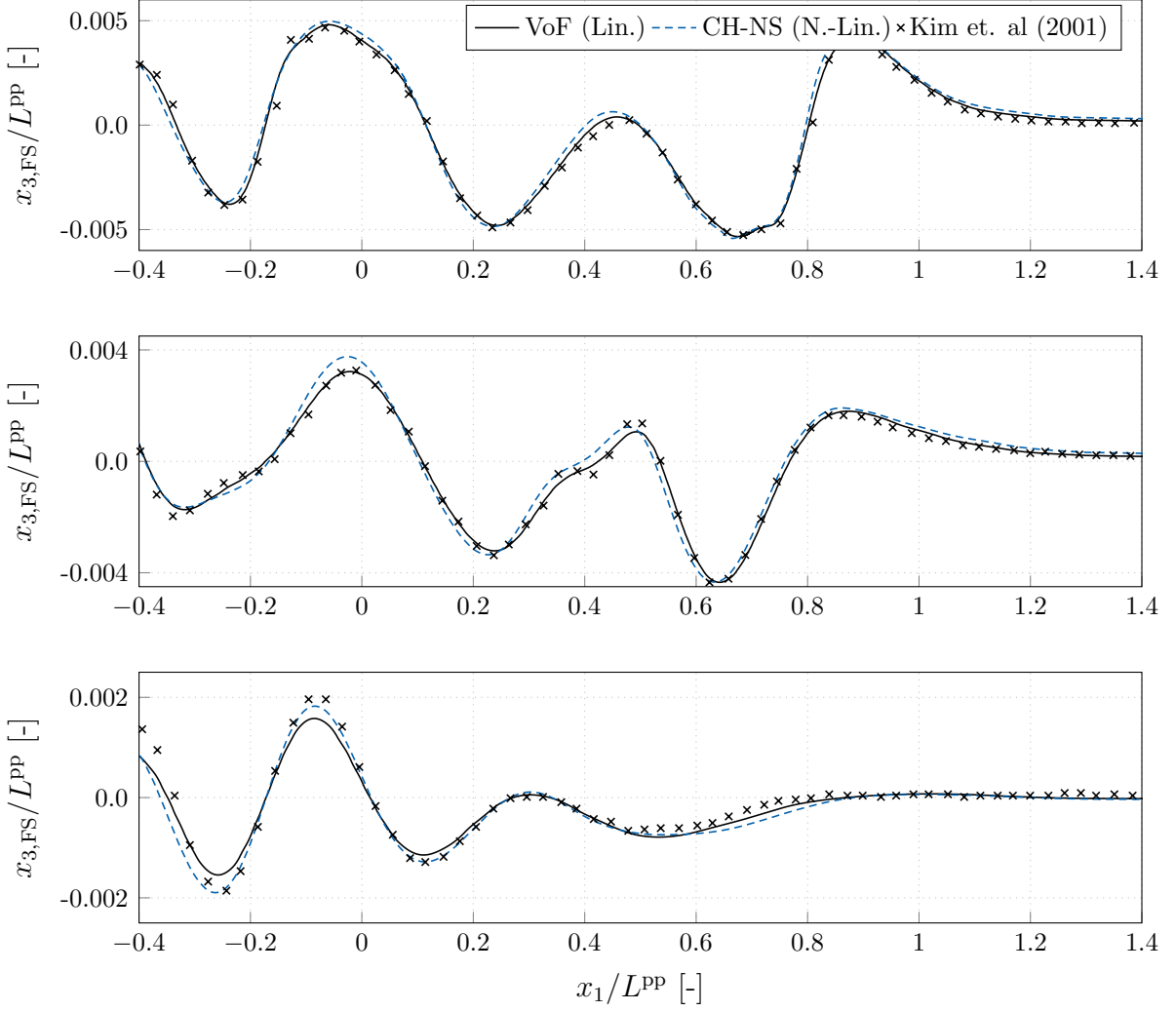


Abbildung 2: Kriso-Containership ($Re = 1.4 \cdot 10^7$ und $Fn = 0.26$): Vergleich der gemessenen und vorhergesagten Wellenerhebungen in drei seitlichen Ebenen, d.h. nahe am Schiffsrumpf bei (a) $x_2/L^{PP} = 0.0741$, (b) bei $x_2/L^{PP} = 0.1509$ und an einer entfernten Position (c) $x_2/L^{PP} = 0.4224$.

eingeführt. Die heuristische Modifikation verletzt zwar die duale Konsistenz, regularisiert jedoch die Lösung des adjungierten Systems. Der Term kann mit einem primalen Gegenspieler der CH-VoF-Formulierung verbunden werden, um Dualitätskonflikte wie zuvor beschrieben zu lösen. Die folgenden neuen Aspekte der adjungierten Zwei-Phasen-Modellierung beziehen sich auf:

1.5 Herleitung von diskreten adjungierten VoF-Formulierungen.

Unmischbare Flüssigkeiten werden durch diskontinuierliche Dichten und Zähigkeiten an einer (idealerweise) scharfen Grenzfläche modelliert. Dies erfordert in der Regel kompressive, *Downwind*-gerichtete, nichtlineare Näherungen der primalen konvektiven Flüsse. Im Rahmen des Projekts wurden die entsprechenden adjungierten Schemata zum ersten Mal hergeleitet. Die Aufmerksamkeit wurde auf zwei prominente kompressive Verfahren beschränkt, nämlich das *High Resolution Interface Capturing Scheme* (HRIC, [26]) und das *Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes* (CICSAM, [37]). Entlang des von [36] vorgeschlagenen Weges be-

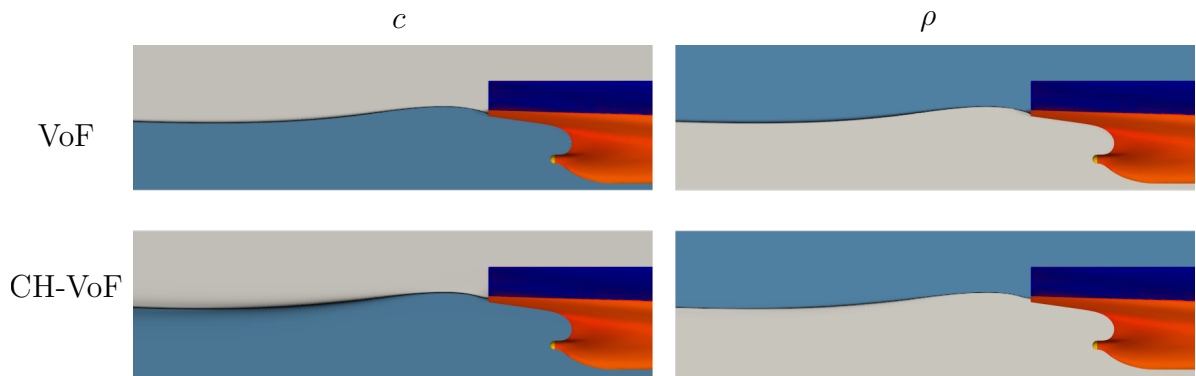


Abbildung 3: Krisko-Containerschiff ($Re = 1.4 \cdot 10^7$ und $Fn = 0.26$): Konzentration (links) und Dichtefeld (rechts), erhalten aus einer VoF Simulation mit linearer Zustandsgleichung (oben) und einer CH-VoF Simulation mit nichtlinearer Zustandsgleichung (unten).

gann die Herleitung mit dem diskreten primalen Ansatz und verwendete sog. partielles Summieren (engl. *Summation by Parts*), um die entsprechenden adjungierte Formulierungen herzuleiten, welche anschließend in einem kontinuierlichen Sinne interpretiert wurden. Es hat sich gezeigt, dass die dualen Schemata die primalen Verfahren auf Basis eines *Normalized-Variable-Diagramm* (NVD) rigoros spiegeln.

1.6 Formulierung und Umsetzung einer Adjungierten-VoF-*Subcycling*-Strategie.

Bei stationären Anwendungen werden die primalen und dualen Verfahren in einer Pseudozeit hergeleitet und die Integration des dualen Ansatzes wird um das konvergierte primale Feld herum durchgeführt. Um die Übereinstimmung der primalen und dualen Integration zu gewährleisten, wurde eine adjungierte *Subcycling*-Strategie eingeführt. Daher unterliegt das adjungierte System den gleichen Zeitschrittrestriktionen (auf Basis der lokalen Courant-Zahl) wie das primale System, ist unabhängig vom primalen Zeithorizont und bildet einen robusten sowie a priori stabilen Lösungsprozess.

1.7 Eine neuartige Kombination der inkonsistenten adjungierten VoF-Methode mit dem CH-VoF-Ansatz.

Die Kombination der CH-VoF-Bemühungen mit ihrem adjungierten Komplement ermöglicht eine robuste und (flexibel-) konsistente adjungierte Zweiphasenformulierung.

1.8 Formulierung einer diskret differenzierbaren Zustandsgleichung.

Im Gegensatz zu einem linearen Materialgesetz, welches eine konstante Ableitung in Bezug auf die Konzentration liefert, zeigen nichtlineare Alternativen einen verstärkten lokalen Beitrag entlang der Grenzflächenregion, der zu den reinen Phasen hin deutlich abnimmt. Im Grenzbereich der scharfen Grenzfläche verwandelt sich die verwendete sigmoide (z. B. hyperbolische Tangente) Zustandsgleichung in eine sprungartige Funktion und das adjungierte System erfährt einen abrupten (Dirac-) Impuls entlang der Grenzfläche. Aus diskreter Sicht verschiebt das adjungierte System den Phasenübergangsbereich konzeptionell unter die Gitterauflösung, was wiederum einen Ansatz mit eingefrorener Konzentration reproduziert, da das diskrete System nicht in

der Lage ist, jede lokale adjungierte Konzentrationsquelle aufzulösen. Daher wurde die primale Schärfung (1.4) im adjungierten Modus umgedreht.

Die Herleitung der adjungierten Zweiphasen-Diskretisierung (1.5/6) wurde in [17] veröffentlicht. Ein beispielhafter Testfall bezieht sich auf das Wellenfeld stromabwärts eines eingetauchten NACA0012-Tragflügels bei einem Anstellwinkel von 5° in Übereinstimmung mit experimentellen Daten von [6, 7]. Das adjungierte System wurde für ein Kraft- und ein inverses Konzentrationskriterium gelöst. Die Ergebnisse der Kraft-Funktional-Studie zeigen, dass der Einfluss der CH-basierten Zähigkeit auf die vorhergesagte Sensitivität vernachlässigbar ist, während die Robustheit des Verfahrens deutlich verbessert wird. Der diffusive Einfluss der zusätzlichen (synthetischen) Zähigkeit auf das adjungierte Konzentrationsfeld ist in Abb. 4 (a) für verschiedene Größenordnungen der synthetischen Zähigkeit dargestellt. Mit zunehmenden Werten wird das ursprünglich parabolische Feld zu einem elliptischen Feld verschmiert. Außerdem zeigt Abb. 4 (b), dass eine erhöhte Schein-Zähigkeit den Sprung des adjungierten Drucks entlang der freien Oberfläche verringert und somit das numerische Verfahren stabilisiert.

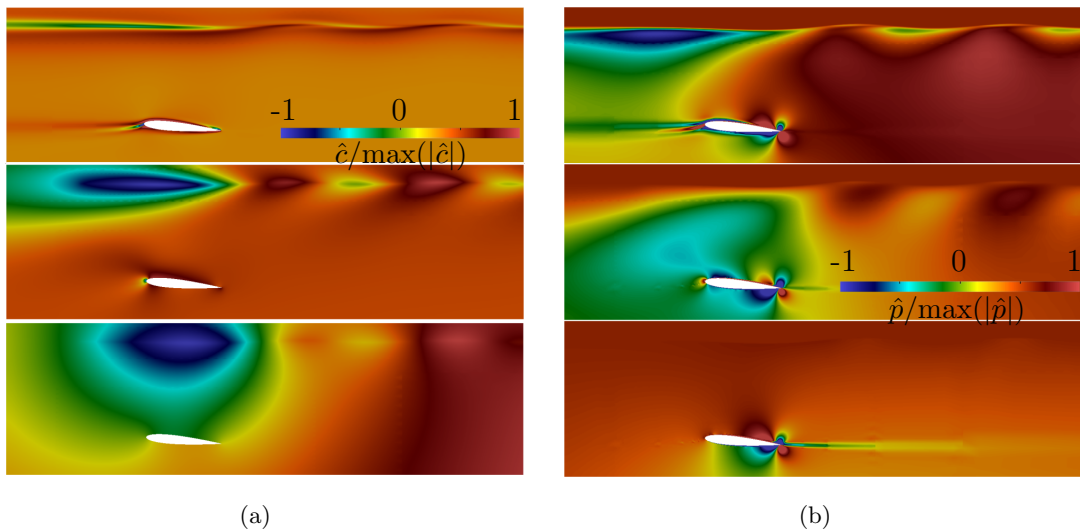


Abbildung 4: Eingetauchter Tragflügel ($Re_L = 144\,855$, $Fn = 0.567$): Normalisierte (links) adjungierte Konzentrations- und (rechts) adjungierte Druckverteilung für das inverse Konzentrationsziel um das Profil für eine von $\nu^c = 10^{-4}$ (oben) über $\nu^c = 1$ (Mitte) bis $\nu^c = 10^4$ (unten) zunehmende synthetische Zähigkeit.

Eine Veränderung der Strömung durch die Formveränderung hat Einfluss auf die Schwimmelage. Die Neuerungen im Vergleich zum Stand der Technik bestehen in:

1.9 Optimierung der Form von frei schwimmenden Schiffen.

Das gradientenbasierte Optimierungsverfahren wurde um ein adaptives Schwimmelage-Modul ergänzt. Letzteres wurde nicht differenziert und während der adjungierten Simulation als eingefroren betrachtet. Somit erfuhr jede neue Form eine Anpassung ihrer T&T lediglich während der primalen Simulation.

Es wurden verschiedene Studien mit und ohne freier T&T während der Optimierung untersucht. Enthaltene Beispiele unterstreichen die Leistungsfähigkeit des Ansatzes der eingefrorenen

Schwimmlage und liefern teilweise drastisch verbesserte Schiffsrumpfformen. Es konnte auch gezeigt werden, dass eine zunächst festgehaltene Schwimmlageänderung zu drastischen Optimierungsverlusten führen kann, wenn die endgültige Form freigegeben wird.

2 Verbesserter Optimierungsprozess

Da die lokalen Formoptimierungen in diesem Projekt durch ein Verfahren des steilsten (Gradienten) Abstiegs gekennzeichnet waren, musste nach der erfolgreichen Bestimmung der Formsensitivität (Ableitung) eine geeignete Annäherung an den Formgradienten gewählt werden. Im Rahmen des Projekts wurden Techniken untersucht, um aus der verfügbaren Formsensitivität eine Abstiegsrichtung zu erhalten. Dieser entscheidende Teil eines robusten, industrialisierten, knotenbasierten Optimierungsverfahrens hängt von der Wahl der betrachteten Oberflächenmetrik ab. Prominente Beispiele sind Metriken vom Typ Laplace-Beltrami (LB) oder Steklov-Poincaré (SP), vgl. [32]. Der LB-Ansatz arbeitet ausschließlich im Tangentialraum der für den Entwurf freigegebenen Formkomponenten, während der SP-Ansatz zu einer volumenbasierten Formulierung führt, bei der die Ergebnisse auf den Rand projiziert werden und die Aktualisierung des gesamten Volumennetzes implizit gleichzeitig mit der Formaktualisierung erfolgt. Die Möglichkeit, standardisierte und vom Strömungslöser bereitgestellte Routinen (Assemblieren, Lösen usw.) zu verwenden, welche in der Regel für *High-Performance-Computing* (HPC) optimiert sind, begünstigt den SP-Ansatz. Die innovativen Merkmale des Projekts beziehen sich auf:

- 2.1 Es wurde ein impliziter SP-Ansatz vorgestellt, der nur auf der Sensitivitätsebene wirkt und von sich aus glatte Formen liefert. Besonderes Augenmerk wurde auf die Einhaltung geometrischer Bedingungen gelegt, wie z.B. konstant verdrängtes Wasservolumen, maximale Außenabmessungen oder ein ebenes Spiegelheck.

Der Ansatz wurde auf der Grundlage eines p-Laplace-Ansatzes verallgemeinert, vgl. [25].

Die technische Turbulenzbehandlung bezieht sich in der Regel auf Reynold-gemittelte (RANS) Strategien und verwendet meist Boussinesq-Viskositätsmodelle (BVM), die auf differentiellen Transportgleichungen für einen oder zwei Turbulenzparameter basieren, vgl. [38]. Der Einfluss der Variation der Turbulenzparameter ist eine offene Diskussion ([24]) und Optimierungen komplexer technischer Strömungen unter Verwendung vollständig konsistenter, differenzierter Turbulenztransportmodelle sind aufgrund der signifikanten Zunahme der Komplexität selten ([28]). Die vorliegende Strategie konzentrierte sich auf das wandnahe Strömungsmodell, welches für die Sensitivitätsvorhersage entscheidend ist. Im Gegensatz zu früheren Studien wurde die Aufmerksamkeit auf algebraische adjungierte Strategien beschränkt, unabhängig vom primalen Turbulenzmodell. Ausgangspunkt der Studien war die Analyse einer einfachen unidirektionalen Scherströmung unter Verwendung der Prandtl'schen Mischungsweghypothese ([30, 29]), welche die Grundlage praktisch aller wandfunktionsbasierten RANS-Grenzschichtbeschreibungen bildet. Neue Aspekte beziehen sich auf:

- 2.2 Adjungierte turbulente wandnahe Strömung.

Unter Verwendung von Mischungswegargumenten wurde eine einheitliche algebraische adjungierte Impulsgleichung für die Strategie der eingefrorenen Turbulenz und einen mit dem universellen GdW konsistenten (differenzierten) Ansatz hergeleitet. Der algebraische Charakter ist eine direkte Folge der häufig verwendeten Annahme, dass alle primalen Strömungseigenschaften algebraisch mit der Reibungsgeschwindigkeit in der logarithmischen Schicht skalieren. Er ist kompatibel mit den Wandfunktionsannahmen für prominente BVM, welche auf der Mischungsweghypothese beruhen.

2.3 Adjungiertes universelles Wandgesetz.

Es wurde ein adjungiertes Impuls-GdW abgeleitet, welches seinem primalen Gegenstück in vielen Aspekten ähnelt.

2.4 Algebraisches adjungiertes Turbulenzmodell.

Ein einfacher algebraischer Ausdruck lieferte eine konsistente Schließung der adjungierten Impulsgleichung in der logarithmischen Schicht. Dies könnte auch als Näherungslösung für allgemeinere adjungierte Strömungen dienen, während für die primale Strömung weiterhin die Standard-BVM mit einer oder zwei Gleichungen verwendet werden. Die Ergebnisse, die durch die konsistentere algebraische Schließung erzielt wurden, kamen ohne zusätzliche Kosten zustande und zeigten eine Beschleunigung des Optimierungsprozesses sowie verbesserte optimale Lösungen. Ein versteckter Vorteil des vorgeschlagenen GdW-konsistenten Ansatzes ist die verbesserte Stabilität des numerischen Rahmens aufgrund einer erhöhten Zähigkeit.

Weiteres Material über das adjungierte Wandgesetz ist in [19, 15] verfügbar. Ein exemplarischer Fall untersuchte das adjungierte universellen Wandgesetz für eine Impulsgrenzschicht, welche besonders für die konsistente Implementierung von adjungierten Wandfunktionen relevant ist. In Übereinstimmung mit seinem primalen Begleiter folgt das adjungierte Komplement des Wandgesetzes einem zweischichtigen Ansatz, der die effektive Zähigkeit in Bereiche der viskosen Schicht ($\mu_t/\mu \rightarrow 0$) und der logarithmischen Schicht ($\mu/\mu_t \rightarrow 0$) einschränkt. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der *Low-Reynolds*-Studien. Für alle untersuchten Reynoldszahlen stimmen die Ergebnisse mit dem hergeleiteten GdW gut überein. Alle Ergebnisse weisen einen schmalen Übergangsbereich auf, welcher durch einen van-Driest-Term ausgelöst wird. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse für die *High-Reynolds*-Simulationen. Es ist zu sehen,

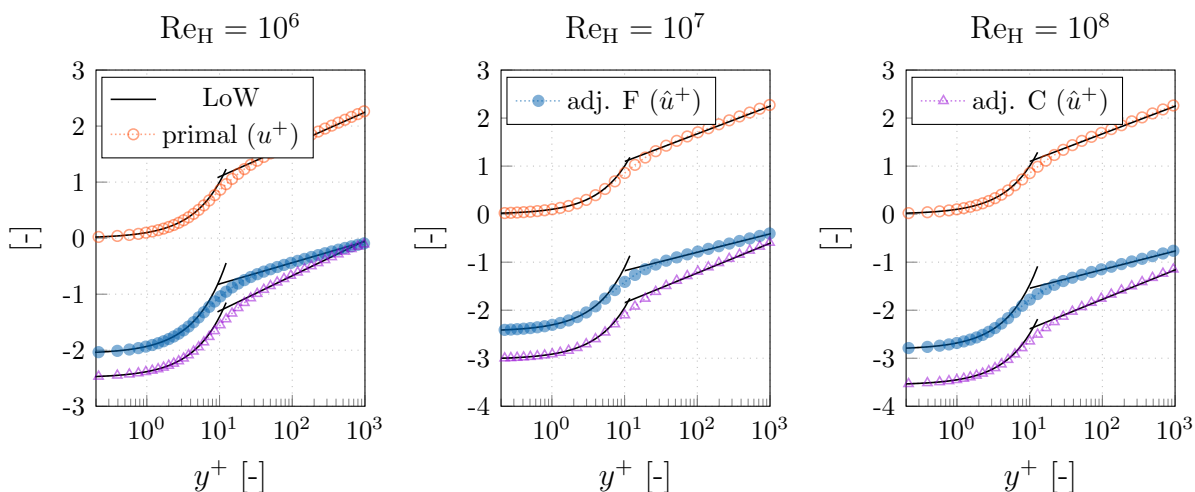


Abbildung 5: Vergleich der vorhergesagten primalen und adjungierten Geschwindigkeitsprofile unter Verwendung der eingefrorenen Turbulenz (F) sowie des Wandgesetz-konsistenten (C) Ansatzes für eine turbulente Kanalströmung bei Reynoldszahlen zwischen $10^6 \leq Re_H \leq 10^8$, ansteigend von links nach rechts (*Low-Reynolds*-Formulierung).

dass der logarithmische Bereich in Kombination mit einem $k - \varepsilon$ BVM erneut angemessen reproduziert wird.

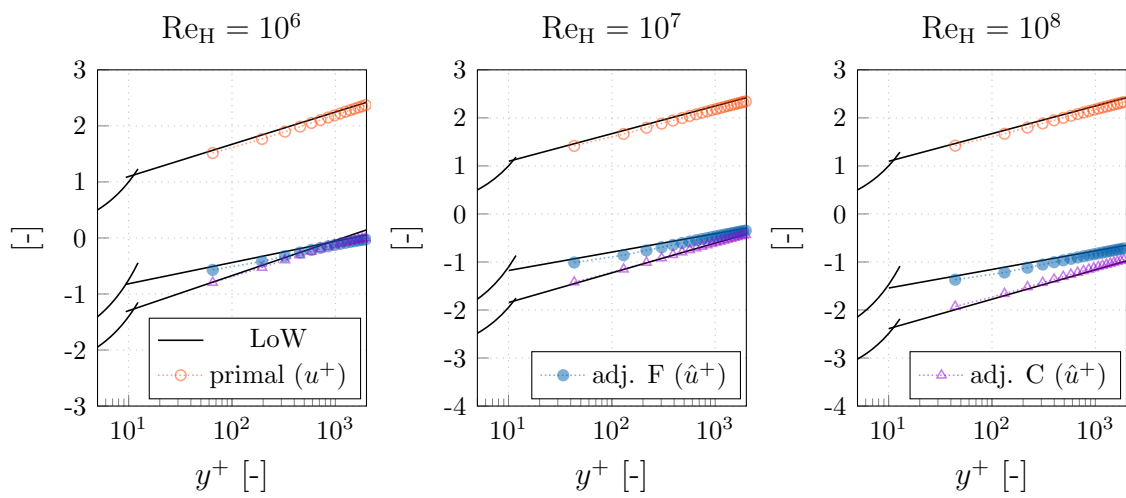


Abbildung 6: Vergleich der vorhergesagten primalen und adjungierten Geschwindigkeitsprofile unter Verwendung der eingefrorenen Turbulenz (F) sowie des Wandgesetz-konsistenten (C) Ansatzes für eine turbulente Kanalströmung bei Reynoldszahlen zwischen $10^6 \leq Re_H \leq 10^8$, ansteigend von links nach rechts (*High-Reynolds-Formulierung*).

3 Optimierung von Schiffen

Die in dem Vorhaben entwickelten Verfahren wurden an zwei Testfällen zur Rumpfformoptimierung getestet, einer Doppelendfähre (DEF) und einem Offshoreversorger (OSV). Während sich der akademische Partner (TUHH) auf Optimierungen im Modellmaßstab konzentriert hat, wurde die Prozesskette beim Anwendungspartner (Voith Turbo Schneider Propulsion GmbH & Co. KG) an den jeweiligen Großausführungskonfigurationen unter Froudscher Ähnlichkeit getestet. Im Folgenden werden daher Optimierungsergebnisse im Modellmaßstab präsentiert, welche jeweils den strömungsinduzierten Widerstand unter Erhaltung des verdrängten Wasservolumens mit weiteren technischen Nebenbedingungen bei freier T&T minimieren.

3.1 Doppelendfähre

Die erste Anwendung bezog sich auf eine DEF im Modellmaßstab 1:8,75, wie sie in den Abbildungen 7 und 8 (a) dargestellt ist. Da sich eine doppelendige Fähre sowohl vorwärts ($V_1 < 0$) als auch rückwärts ($V_1 > 0$) bewegt, musste die Optimierung diese Symmetrie nachahmen und die Längssymmetrie entlang der zentralen $x_2 - x_3$ -Ebene (mittlerer Schiffsquerschnitt) des ursprünglichen Rumpfes erhalten, vgl. Abb. 8 (a).

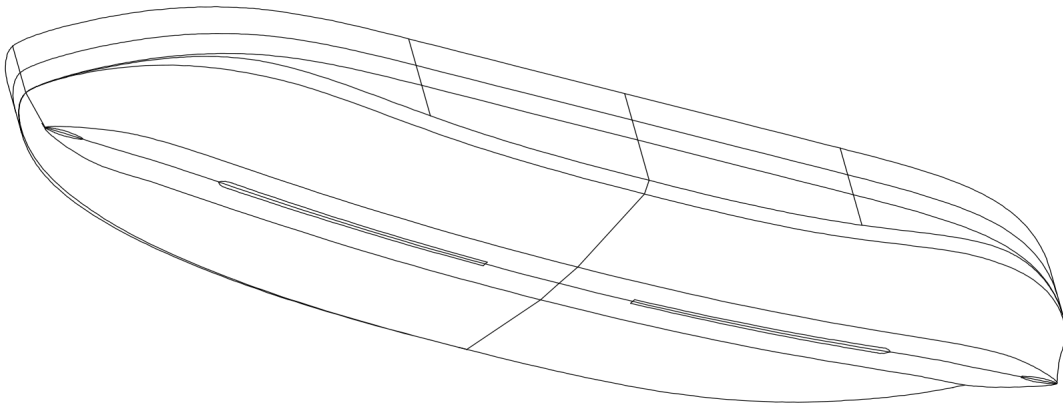


Abbildung 7: Doppelendfähre: Perspektivische 3D Ansicht der initialen Geometrie.

Adaptive T&T wurde berücksichtigt und die geometrischen Zwänge zielten darauf ab, die ursprünglichen Hauptabmessungen sowie die Verdrängung beizubehalten und die Symmetrie des Rumpfes im Hinblick auf eine identische Vorwärts- und Rückwärtsfahrt zu gewährleisten. Letzteres erforderte, vereinfacht gesprochen, die Umformulierung des Kraftkostenfunktionals, in dem die Kräfte der Vorwärts- (J^+) und Rückwärtsfahrt (J^-) getrennt ausgewertet wurden, um anschließend eine gleich gewichtete Summe zu bilden: $J^{+,-} = 0.5 J^+ + 0.5 J^-$. Bei vollkommen symmetrischer Ausgangsgeometrie und Domäne genügte jedoch die Bestimmung der Sensitivität für eine Fahrtrichtung, z. B. J^+ , mit einer ungespiegelten Geometrie, wenn die Sensitivität anschließend um die Schiffsmittellebene gespiegelt wurde. Die gespiegelte Sensitivität sollte genau der umgekehrten Strömungssensitivität, z.B. J^- , und damit der entgegengesetzten Fahrtrichtung entsprechen. Beide Sensitivitätsverteilungen wurden kombiniert, um die gradientenbasierte Optimierung zu steuern. Ein perfekt gespiegeltes Gitter mit einer identischen Verteilung der Kontrollvolumen auf beiden Seiten der mittleren Schiffssymmetrieebene

war daher sehr zu begrüßen. In diesem Fall konnte eine Interpolation der gespiegelten Sensitivitäten durch eine einfache Überschreibung umgangen werden, und die optimierte Form blieb während der gesamten Optimierung symmetrisch.

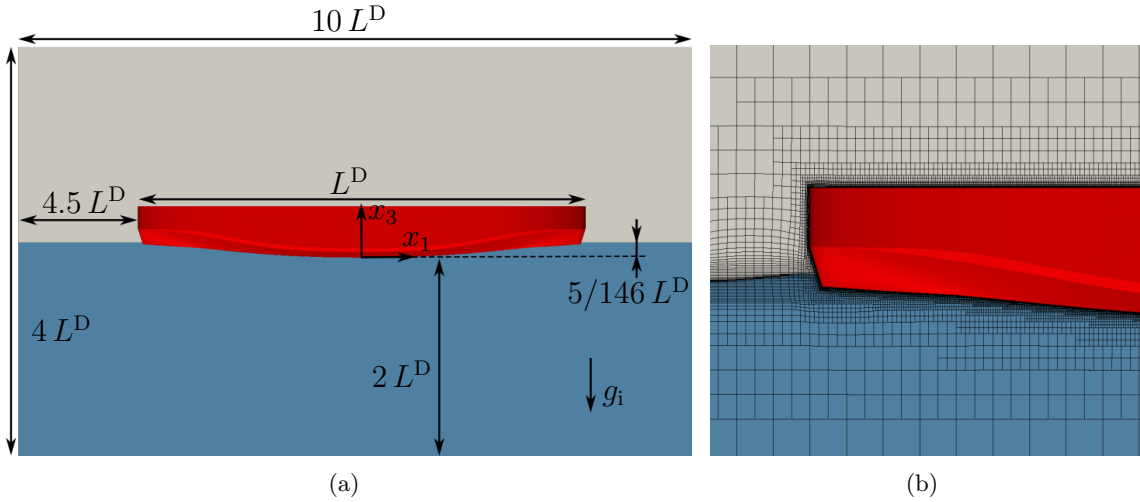


Abbildung 8: Doppelendfähre ($Re_L = 6.26 \cdot 10^6$ und $Fn = 0.25$): (a) Schematische Skizze der Ausgangskonfiguration und (b) unstrukturiertes numerisches Gitter um das Heck und die freie Oberfläche.

Die DEF bestand aus einem Rumpf, einem Schanzkleid und einem Deck, wie in Abb. 7 und 8 skizziert, wobei das Koordinatensystem an der Unterseite des Rumpfes in der Schiffsmitte platziert und die freie Oberfläche in der Ebene $x_1 - x_2$ bei $x_3/L^D = 5/146$ basierend auf der DEF-Länge L^D initialisiert wurde. Die Untersuchung wurde für eine turbulente Strömung bei $Re_L = V_1 L^D / \nu^b = 6.26 \cdot 10^6$ und $Fn = V_1 / \sqrt{GL^D} = 0.25$, basierend auf der Gravitationsbeschleunigung $G = \|g_i\|$, der Einströmgeschwindigkeit $V_1 = \|v^{in}\|$ und der kinematischen Viskosität des Wassers ν^b durchgeführt. Es wurde eine dimensionslose Wellenlänge von $\lambda = \lambda/L^D = 2\pi Fn^2 = 0.393$ erwartet.

Das dreidimensionale Volumen hatte eine Länge, Höhe und Breite von $10 L^D$, $4 L^D$ sowie $4 L^D$. Die Geometrie war symmetrisch um die Ebene $x_1 - x_3$ und $x_2 - x_3$. Daher wurde nur die Hälfte der lateralen x_2 -Ausdehnung berücksichtigt und das numerische Gitter wurde konstruktionsbedingt um die mittlere Schiffsebene $x_2 - x_3$ gespiegelt. Die Einlass- und Auslassgrenzen befanden sich $4,5$ Geometrielängen vom Ursprung entfernt. Das symmetrische unstrukturierte numerische Gitter ist in Abb. 8 (b) dargestellt und bestand aus etwa $2 \cdot 10^6$ Kontrollvolumina. Für die vollturbulenten Simulationen wurde ein auf Wandfunktionen (Abb. 6) basierendes $k - \omega$ SST-Modell verwendet, und die konvektiven Terme für Impuls und Turbulenz wurden mit dem *Quadratic Interpolation of Convective Kinematics* (QUICK)-Schema approximiert. Das HRIC-Schema wurde für den kompressiven Konzentrationstransport verwendet. Bei der Simulation wurde eine Hauptströmung gegen die x_1 -Achse verwendet. Geschwindigkeits- und Konzentrationswerte wurden am Einlass vorgegeben, und es wurden reibungsfreie Wände entlang der oberen und unteren sowie der entfernten lateralen Ebenen angenommen. Entlang des Auslasses an der minimalen x_1 -Position wurde eine hydrostatische Druckrandbedingung vorgegeben.

Es wurden drei Optimierungsstudien durchgeführt, wobei lediglich die Schrittweiten innerhalb des Gradientenverfahrens variiert wurden. Letztere folgte aus einer vorgeschriebenen maximalen Verschie-

bung der jeweils ersten Formänderung, welche einem, zwei oder vier Tausendstel der Schiffslänge entsprach. Die relative Reduktion des Kostenfunktional ist in Abb. 9 (a) dargestellt, wobei der Optimierungsprozess immer dann terminiert wurde, wenn die relative Änderung der Widerstandskraft unter eine definierte Schranke von $10^{-02}\%$ fiel. Es ist eine leichte Abhängigkeit des Gradientenverfahrens von der Schrittweite zu erkennen, da im Falle der kleinsten [größten] Schrittweite eine Abnahme von ca. $\Delta J = (J^{\text{opt}} - J^0)/J^0 = 5.75\%$ [5.35%] erzielt wurde. Eine gestrichelte, horizontale Linie indiziert den finalen Zielfunktionalwert nach Neuvernetzung inkl. Neusimulation der letzten Form der Optimierung mit mittlerer Schrittweite. Der Optimierungsgewinn verringert sich leicht, liegt aber noch immer bei mehr als 5%. Darüber hinaus sind in 9 (b) relevante hydrodynamische Parameter der Optimierung mit mittlerer Schrittweite über die Optimierung aufgetragen. Während sich die Tauchung ($\Delta S = (S^{\text{opt}} - S^0)/S^0 > 0.0\%$) erhöht, trimmt ($\Delta T = (T^{\text{opt}} - T^0)/T^0 < 0.0\%$) das Schiff zurück. Die Verdrängung ($\Delta D = (D^{\text{opt}} - D^0)/D^0 \approx 0.0\%$) bleibt während der Optimierung konstant.

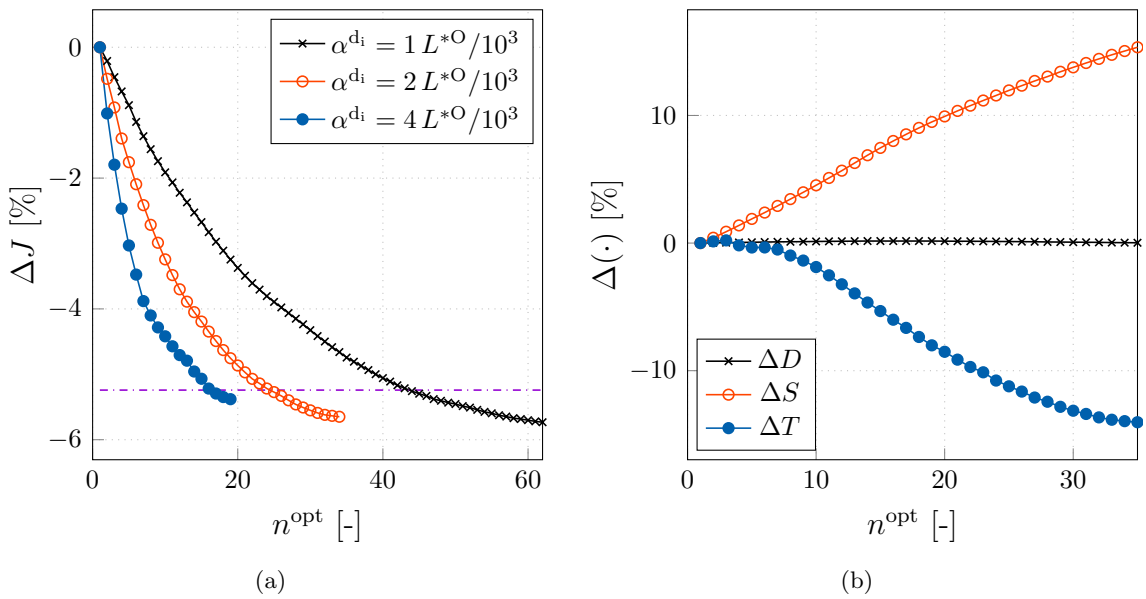


Abbildung 9: Doppelendfähre ($\text{Re}_L = 6.26 \cdot 10^6$ und $\text{Fn} = 0.25$): (a) Relative Kostenfunktionalabnahme für drei unterschiedliche Schrittweiten (α^{d}) sowie (b) die relative Änderung der Verdrängung (ΔD), der Tauchung (ΔS) sowie der Trimmung (ΔT) für die Optimierung mit der mittleren Schrittweite. Die gestrichelte, horizontale Linie in magenta indiziert den finalen Zielfunktionalwert nach Neuvernetzung der letzten Form der Optimierung mit mittlerer Schrittweite.

3.2 Offshore Versorgungsschiff

Die zweite Anwendung bezog sich auf ein Offshore-Versorgungsschiff im Modellmaßstab 1:9, bei dem die Rumpflänge L^{O} im Vergleich zur Fahrgeschwindigkeit gering war, vgl. Abb. 11. Daher operierte das Versorgungsschiff bei vergleichsweise großen Froude-Zahlen ($\text{Fn} > 0,3$) und erfuhr hohe Wellenwiderstände, die z.B. aus brechenden Wellen folgten. Eine Änderung der letzteren konnte eine Änderung des Auftriebs auslösen, daher stellte das OSV einen konkurrenzfähigen Testfall für das vorgestellte zweiphasige Formoptimierungssystem unter freier Schwimmlage dar. Die betrachteten geometrischen Randbedingungen bezogen sich auf die Erhaltung eines ebenen Spiegelhecks, welches nur tangentielle

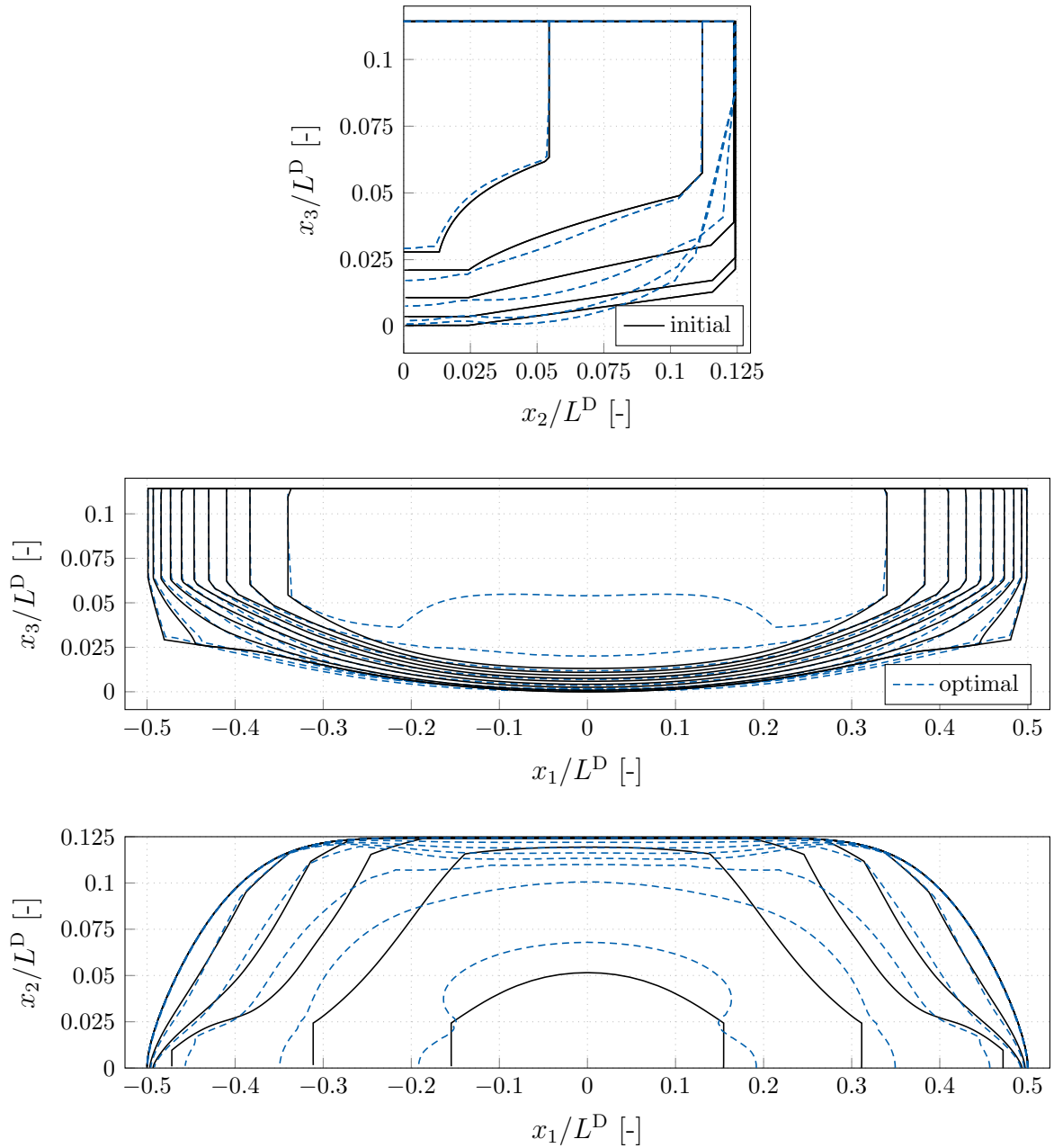


Abbildung 10: Doppelendfähre ($\text{Re}_L = 6.26 \cdot 10^6$ und $\text{Fn} = 0.25$): (Oben) Spanten, (Mitte) Wasserlinien und (unten) Längslinien für die ursprüngliche (schwarz) und die optimierte (blau, gestrichelt) Geometrie, welche durch eine Optimierung mit Anpassung von T&T erzielt wurde.

Verformung zulies, die Einhaltung einer vorgeschriebenen maximalen Schiffslänge sowie die Konservierung des vom Wasser verdrängten Volumens. Die Untersuchung wurde für eine turbulente Strömung bei $\text{Re}_L = V_1 L^D / \nu^b = 10.4 \cdot 10^6$ und $\text{Fn} = V_1 / \sqrt{GL^D} = 0.368$, basierend auf der Gravitationsbeschleunigung $G = \|g_i\|$, der Fahrtgeschwindigkeit V_1 und der kinematischen Viskosität des Wassers ν^b durchgeführt.

Das dreidimensionale Gebiet hatte eine Länge, Höhe und Breite von $8L^O$, $6L^O$ sowie $4L^O$ und es wurde eine dimensionslose Wellenlänge von $\lambda^{\text{MS}} = \lambda/L^O = 2\pi \text{Fn}^2 = 0,851$ erwartet. Das verwendete unstrukturierte numerische Gitter ist in Abb. 12 (b) dargestellt und bestand aus ungefähr

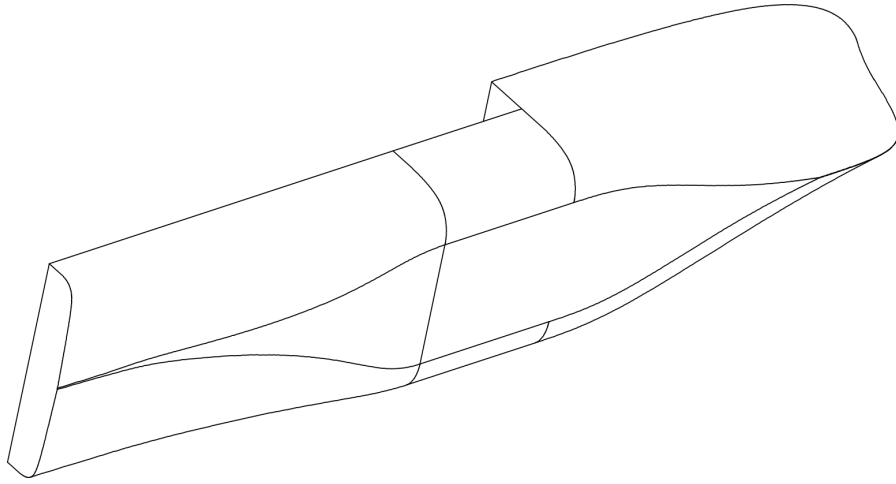


Abbildung 11: Offshore-Versorgungsschiff: Perspektivische 3D Ansicht der initialen Geometrie.

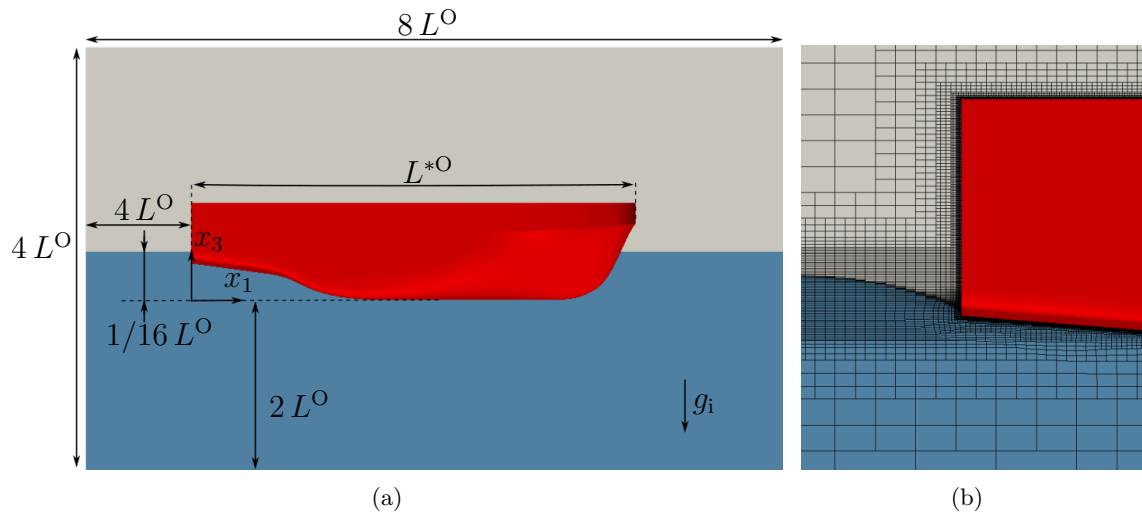


Abbildung 12: Offshore-Versorgungsschiff ($Re_L = 10.4 \cdot 10^6$ und $Fn = 0.368$): (a) Schematische Darstellung der Ausgangskonfiguration und (b) unstrukturiertes numerisches Gitter um das Heck und die freie Oberfläche für eine Modellkonfiguration.

$3 \cdot 10^6$ Kontrollvolumina. Aufgrund der Symmetrie wurde nur die Hälfte der Geometrie in lateraler Richtung modelliert. Für die vollturbulenten Simulationen wurde ein auf Wandfunktionen basierendes $k - \omega$ SST-Modell verwendet, und die konvektiven Terme für den primalen Impuls sowie die primale Turbulenz wurden mit dem QUICK-Schema approximiert. Das HRIC-Schema wurde für den kompressiven Konzentrationstransport verwendet. Am Einlass waren Geschwindigkeits- und Konzentrationswerte vorgeschrieben, entlang der oberen, unteren und äußeren Begrenzungen wurden reibungsfreie Wände angenommen und entlang des Auslasses wurde eine hydrostatische Druckrandbedingung vorgegeben. Entlang der Schiffsmittlebene wurde eine Symmetriebedingung festgelegt. Der dimensionslose Wandnormalabstand der ersten Gitterschicht betrug $y^+ \approx 50$ und die freie Oberflächenverfeinerung verwendete ungefähr $\delta x_1/\lambda = \delta x_2/\lambda = 1/50$ Zellen in der Längs- sowie in der Querrichtung und $\delta x_3/\lambda = 1/500$ Zellen in der Normalrichtung.

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich auf ein frei schwimmendes Ausgangsschiff, bei dem

T&T alle 10000. Zeitschritte angepasst wurden. Die Entwicklung des Widerstandskoeffizienten der Ausgangsgeometrie während der Laufzeit ist in Abb. 13. Die Anpassung des Auftriebs wird an den schwankenden Werten der Widerstandskoeffizienten deutlich.

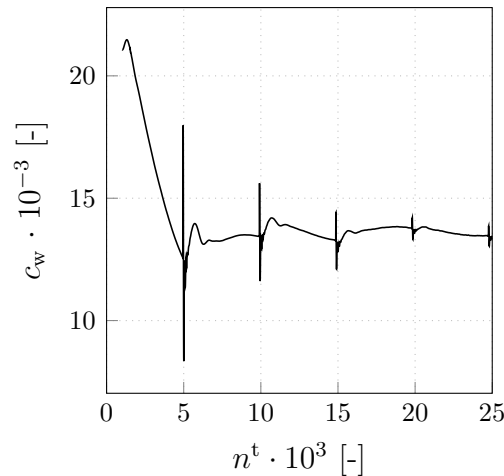


Abbildung 13: Offshore-Versorgungsschiff ($Re_L = 10.4 \cdot 10^6$ und $Fn = 0.368$): Widerstand Koeffizient für die Ausgangsform mit adaptivem T&T.

Analog zur DEF-Optimierung, wurden drei Optimierungsstudien mit unterschiedlichen Schrittweiten durchgeführt. Letztere folgte erneut aus einer vorgeschriebenen maximalen Verschiebung der jeweils ersten Formänderung, welche einem, zwei oder vier Tausendstel der Schiffslänge entsprach. Die relative Reduktion des Kostenfunktionalis ist in Abb. 14 (a) dargestellt, wobei der Optimierungsprozess erneut dann terminiert wurde, wenn die Änderung der Widerstandskraft unter eine definierte Schranke von $10^{-02}\%$ fiel. Im Gegensatz zur DEF-Optimierung konvergieren nun alle Optimierungen bei einem ähnlichen Wert des Kostenfunktionalis von ca. $\Delta J = 5.9\%$. Eine gestrichelte, horizontale Linie indiziert den finalen Zielfunktionalwert nach Neuvernetzung inkl. Neusimulation der letzten Form der Optimierung mit kleinster Schrittweite. Der Optimierungsgewinn verringert sich erneut minimal auf $\Delta J = 5.7\%$. Darüber hinaus sind in Abb. 14 (b) die relevanten hydrodynamischen Parameter der Optimierung bei mittlerer Schrittweite aufgetragen. Die Verdrängung nimmt minimal um $\Delta D = 0.2\%$ ab, das OSV taucht leicht aus ($\Delta T < 0.0\%$) und trimmt ($\Delta S < 0.0\%$) zurück.

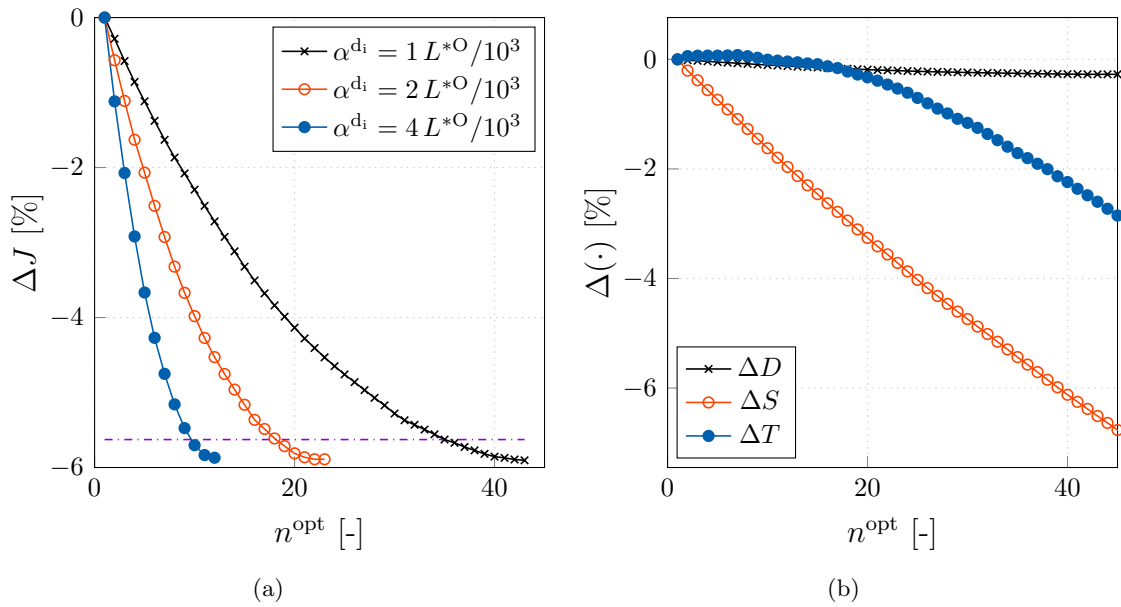


Abbildung 14: Offshore-Versorgungsschiff ($Re_L = 10.4 \cdot 10^6$ und $Fn = 0.368$): (a) Relative Kostenfunktionalabnahme für drei unterschiedliche Schrittweiten (α^{d}) sowie (b) die relative Änderung der Verdrängung (ΔD), der Tauchung (ΔS) sowie der Trimmung (ΔT) für die Optimierung mit der mittleren Schrittweite. Die gestrichelte, horizontale Linie in magenta indiziert den finalen Zielfunktionalwert nach Neuvernetzung der letzten Form der Optimierung mit kleinster Schrittweite.

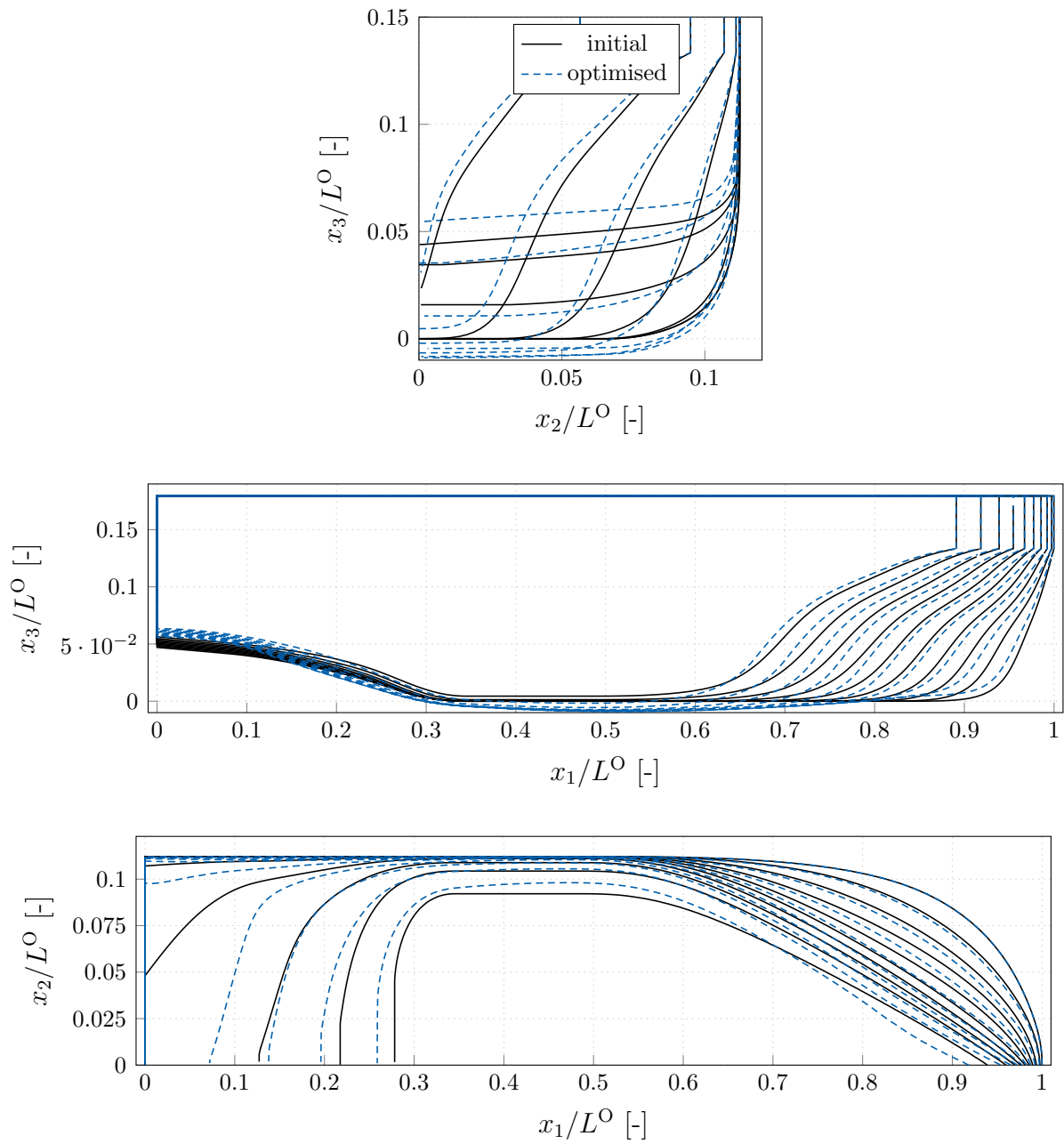


Abbildung 15: Offshore-Versorgungsschiff ($Re_L = 10.4 \cdot 10^6$ und $Fn = 0.368$): (Oben) Spanten, (Mitte) Wasserlinien und (unten) Längslinien für die ursprüngliche (schwarz) und die optimierte (blau, gestrichelt) Geometrie, welche durch eine Optimierung mit Anpassung von T&T erzielt wurde.

4 Weitere Beiträge

Ein weiterer Teil des Projekts befasste sich mit einem kontinuierlichen adjungierten Komplement zu inkompressiblen 2D-Gleichungen erster Ordnung für Grenzschichten. Das Thema wurde durch die Debatte über die Diskretisierung und die Bedeutung der adjungierten transponierten konvektiven Terme (ATK) inspiriert, welche aufgrund der Nichtlinearität des primalen konvektiven Transports entstehen. Die ATK-Terme können bei kompressiblen Strömungen verschwinden, vgl. [33], werden aber auch bei inkompressiblen Simulationen wegen ihres nachteiligen Einflusses auf die numerische Robustheit häufig vernachlässigt, z.B. [27, 35] und [10]. Ziel war es daher, eine einfache, aber relevante Strömungssituation zu analysieren, welche eine Aussage über die Relevanz des ATK-Terms unterstützt. Neuartige Beiträge beziehen sich auf:

4.1 Herleitung von adjungierten Grenzschichtgleichungen.

Es wurde gezeigt, dass die adjungierten Grenzschichtgleichungen auf zwei Arten hergeleitet werden können, entweder nach einer *erst vereinfachen, dann ableiten* oder einer *erst ableiten und dann vereinfachen* Strategie. Der Vereinfachungsschritt umfasste die klassische Grenzschicht-Approximation und der Herleitungsschritt überführte die ursprüngliche Strömungsgleichung in eine dazugehörige adjungierte Gleichung. Beide Ansätze führten zu demselben Ergebnis, was ihre formale Korrektheit unterstrich.

4.2 Herleitung einer adjungierten Blasius-Gleichung.

Die Analysen des gekoppelten primalen/adjungierten Grenzschichtsystems führten zu Ähnlichkeitsparametern, die das PDE-Problem in ein Randwertproblem verwandelten, das durch eine Reihe von gewöhnlichen Differentialgleichungen beschrieben wurde, und – zum ersten Mal – die Formulierung eines adjungierten Komplements zur klassischen Blasius-Gleichung unterstützte.

4.3 Studie der adjungierten transponierten Konvektion.

Es wurde gezeigt, dass der ATK-Term für eine selbstähnliche, laminare Grenzschichtströmung verschwindet. Dieser Befund unterstützt die heuristische Vernachlässigung des Terms, die von vielen Autoren von Studien zur kontinuierlichen adjungierten Optimierung im Falle komplexer technischer Scherströmungen verwendet wird.

4.4 Analytischer Ausdruck für adjungierte laminare Grenzschichtparameter.

Es wurde ein Formalismus hergeleitet, welcher analytische Ausdrücke für eine adjungierte Grenzschichtdicke, die adjungierte Wandschubspannung, die adjungierte Mantelreibung und den adjungierten Widerstandsbeiwert sowie den Ausdruck für die Formsensitivität für ein schergetriebenes Kostenfunktional liefert.

Darzugehöriges Material zu adjungierten Ansätzen für laminare Grenzschichtströmungen wurde in [18, 15] veröffentlicht.

Literatur

- [1] H. Abels, H. Garcke, and G. Grün. Thermodynamically Consistent, Frame Indifferent Diffuse Interface Models for Incompressible Two-Phase Flows with Different Densities. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 22(03):1150013, 2012.
- [2] J. Banks, A. Phillips, and S. Turnock. Free Surface CFD Prediction of Components of Ship Resistance for KCS. In *13th Numerical Towing Tank Symposium, Duisburg, Germany*, page 6 pp, 2010.
- [3] S. Beckers, J. Behrens, and W. Wollner. Duality Based Error Estimation in the Presence of Discontinuities. *Applied Numerical Mathematics*, 144:83–99, 2019.
- [4] J. Brackbill, D. Kothe, and C. Zemach. A Continuum Method For Modeling Surface Tension. *Journal of Computational Physics*, 100(2):335–354, 1992.
- [5] J. Cahn and J. Hilliard. Free Energy of a Nonuniform System. I. Interfacial Free Energy. *The Journal of Chemical Physics*, 28(2):258–267, 1958.
- [6] J. Duncan. An Experimental Investigation of Breaking Waves Produced by a Towed Hydrofoil. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 377(1770):331–348, 1981.
- [7] J. Duncan. The Breaking and Non-Breaking Wave Resistance of a Two-Dimensional Hydrofoil. *Journal of Fluid Mechanics*, 126:507–520, 1983.
- [8] J. Haubner, M. Siebenborn, and M. Ulbrich. A Continuous Perspective on Modeling of Shape Optimal Design Problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 43(3):A1997–A2018, 2021.
- [9] M. Hinze and C. Kahle. A Nonlinear Model Predictive Concept for Control of Two-Phase Flows Governed by the Cahn-Hilliard Navier-Stokes System. In *System Modelling and Optimization*, pages 348–357. Springer, 2011.
- [10] G. Karpouzas, E. M. Papoutsis-Kiachagias, T. Schumacher, E. Villiers, K. C. Giannakoglou, and O. C. Adjoint Optimization for Vehicle External Aerodynamics. *International Journal of Automotive Engineering*, 7(1):1–7, 2016.
- [11] W. Kim, S. Van, and D. Kim. Measurement of Flows Around Modern Commercial Ship Models. *Experiments in Fluids*, 31(5):567–578, 2001.
- [12] J. Kröger. *A Numerical Process for the Hydrodynamic Optimisation of Ships*. PhD thesis, Hamburg University of Technology, 2016.
- [13] J. Kröger, M. Javarian, N. Kühl, and T. Rung. A-Welle: Adjungierte Formoptimierung von Schiffen unter Berücksichtigung des Wellenwiderstandes, 2016. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens: 03SX362B.
- [14] J. Kröger, N. Kühl, and T. Rung. Adjoint Volume-of-Fluid Approaches for the Hydrodynamic Optimisation of Ships. *Ship Technology Research*, 65(1):47–68, January 2018.

- [15] N. Kühn. *Adjoint-Based Shape Optimization Constraint by Turbulent Two-Phase Navier-Stokes Systems*. PhD thesis, Hamburg University of Technology, 2021.
- [16] N. Kühn, M. Hinze, and T. Rung. Cahn-Hilliard Navier-Stokes Simulations for Marine Free-Surface Flows. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2021.
- [17] N. Kühn, J. Kröger, M. Siebenborn, M. Hinze, and T. Rung. Adjoint Complement to the Volume-of-Fluid Method for Immiscible Flows. *Journal of Computational Physics*, 440:110411, 2021.
- [18] N. Kühn, P. Müller, and T. Rung. Continuous Adjoint Complement to the Blasius Equation. *Physics of Fluids*, 33(3):033608, 2021.
- [19] N. Kühn, P. M. Müller, and T. Rung. Adjoint Complement to the Universal Momentum Law of the Wall. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2021.
- [20] B. Lafaurie, C. Nardone, R. Scardovelli, S. Zaleski, and G. Zanetti. Modelling Merging and Fragmentation in Multiphase Flows with SURFER. *Journal of Computational Physics*, 113:134–147, 1994.
- [21] L. Larsson, F. Stern, and M. Visonneau. Gothenburg 2010, A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, 2010. R - Department of Shipping and Marine Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, no: R-10:222.
- [22] D. Luenberger. *Optimization by Vector Space Methods*. John Wiley & Sons, 1969.
- [23] M. Manzke, J. Voss, and T. Rung. Sub-Cycling Strategies for Maritime Two-Phase Flows. In *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, volume 120, pages 237–251. Springer, 2012.
- [24] A. Marta and S. Shankaran. On the Handling of Turbulence Equations in RANS Adjoint Solvers. *Computers & Fluids*, 74:102–113, 2013.
- [25] P. M. Müller, N. Kühn, M. Siebenborn, K. Deckelnick, M. Hinze, and T. Rung. A Novel p -Harmonic Descent Approach Applied to Fluid Dynamic Shape Optimization. *Accepted for publication in: Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021.
- [26] S. Muzaferija and M. Peric. Computation of Free-Surface Flows Using Interface Tracking and Interface-Capturing Methods. In *Nonlinear Water Wave Interaction*, pages 59–100. Wessex Institute of Technology Press, Southampton, 1999.
- [27] C. Othmer. A Continuous Adjoint Formulation for the Computation of Topological and Surface Sensitivities of Ducted Flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 58(8):861–877, 2008.
- [28] E. Papoutsis-Kiachagias and K. Giannakoglou. Continuous Adjoint Methods for Turbulent Flows, Applied to Shape and Topology Optimization: Industrial Applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(2):255, 2016.

- [29] S. Pope. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2001.
- [30] L. Prandtl. Bericht über die Entstehung der Turbulenz. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 5:136–139, 1925.
- [31] A. Prosperetti. Motion of Two Superposed Viscous Fluids. *The Physics of Fluids*, 24(7):1217–1223, 1981.
- [32] V. Schulz and M. Siebenborn. Computational Comparison of Surface Metrics for PDE Constrained Shape Optimization. *Computational Methods in Applied Mathematics*, 16(3):485–496, 2016.
- [33] O. Soto and R. Löhner. On the Computation of Flow Sensitivities from Boundary Integrals. *AIAA Paper*, -(AIAA-04-0112):-, 2004.
- [34] J. Springer and M. Palm. N-Welle: Numerische Optimierung von Schiffen mit hohem Wellenwiderstand, 2016. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens: 03SX362C.
- [35] J. Springer and K. Urban. Adjoint-Based Optimization for Rigid Body Motion in Multiphase Navier-Stokes Flow. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 37(2):B185–B214, 2015.
- [36] A. Stück and T. Rung. Adjoint Complement to Viscous Finite-Volume Pressure-Correction Methods. *Journal of Computational Physics*, 248:402–419, 2013.
- [37] O. Ubbink and R. Issa. A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes. *Journal of Computational Physics*, 153(1):26–50, 1999.
- [38] D. Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD*, volume 2. DCW Industries La Canada, 1998.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Weiterentwicklung von Praxistauglichen Simulationsbasierten Methoden zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Schiffen mittels Formoptimierung (DynAForm)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Niklas Kühn Lucian Rotter Thomas Rung	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30. Juni 2021
	6. Veröffentlichungsdatum Dezember 2021
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Hamburg Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie Am Schwarzenberg-Campus 4 21073 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution FDS/012-2021/Dynamo
	10. Förderkennzeichen 03 SX 453 B
	11. Seitenzahl 28
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 10115 Berlin	13. Literaturangaben 38
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 15
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich (PTJ) – Maritime Technologien (MGS2), 18069 Rostock Dr. Andreas Nitz; Dezember 2021	
18. Kurzfassung Das Vorhaben befasste sich mit der Weiterentwicklung eines simulationsbasierten Prozesses für die hydrodynamische Formoptimierung von frei schwimmenden Schiffsrümpfen, die nicht mischbaren turbulente Zweiphasenströmungen ausgesetzt sind. Das Augenmerk lag auf gradientenbasierten adjungierten Methoden in einer parameterfreien Optimierungsumgebung. Der Schwerpunkt wurde auf Wellen- und Reibungswiderstand bei Froude- und Reynold-Zahlen von praktischem Interesse gelegt. Besonderes Interesse galt (I) genauen und robusten adjungierten Zweiphasen-Strömungsmodellen, einschließlich der Einbeziehung dynamischer Schwimmlageaspekten, (II) einer verbesserten CAD-freien Formparametrisierung für teilweise benetzte Formen, die Fertigungseinschränkungen unterliegen, und (III) der Implementierung und Anwendung des Simulationsmodells zur Optimierung von Schiffen. Die Anwendungen konzentrierten sich auf ein häufig untersuchtes Containerschiff, ein stumpfes Offshore-Versorgungsschiff sowie eine Doppelendfähre. Die Ergebnisse lassen sich auf die Optimierung anderer schiffstechnischer Anwendungen übertragen, z. B. auf den Entwurf von küstennahen Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energien, die Meereswellen in der Brandungszone nahe einer freien Oberfläche nutzen.	
19. Schlagwörter Numerische Strömungsmechanik, simulationsbasierte Optimierung, adjungierte Formoptimierung, Schiffsumströmung, Schiffswiderstand, Strömungssimulation, Zweiphasenströmung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title Weiterentwicklung von Praxistauglichen Simulationsbasierten Methoden zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Schiffen mittels Formoptimierung (DynAForm)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Thomas Rung Lucian Rotter Niklas Kühl	5. end of project June 30st 2021
	6. publication date December 2021
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Hamburg University of Technology Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory Am Schwarzenberg-Campus 4 21073 Hamburg	9. originator's report no. FDS/012-2021/Dynamo
	10. reference no. 03 SX 453 B
	11. no. of pages 28
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) 10115 Berlin	13. no. of references 38
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 15
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Project Office Jülich (PTJ) – Maritime Technologies (MGS2), 18069 Rostock Dr. Andreas Nitz; March 2020	
18. abstract The project dealt with the development of a simulation-based process for the hydrodynamic shape optimization of free-floating ship hulls subjected to non-miscible turbulent two-phase flows. Attention was focused on gradient-based adjoint methods in a parameter-free optimization environment. Emphasis was placed on wave and frictional drag for Froude and Reynold numbers of practical interest. Special interest was given to (I) accurate and robust adjoint two-phase flow models, including the incorporation of dynamic floatation aspects, (II) improved CAD-free shape parameterization for partially wetted shapes subject to manufacturing constraints, and (III) implementation and application to ship optimization. The applications focused on a commonly studied container ship, a blunt offshore supply vessel, and a double-ended ferry. The results can be applied to the optimization of other marine engineering applications, such as the design of offshore renewable energy generation facilities that utilize ocean waves in the surf zone near a free surface.	
19. keywords Computational fluid dynamics, simulation based optimization, adjoint shape optimization, ship flow, drag reduction, flow simulation, two-phase flow	
20. publisher	21. price