

Hydrodynamische Widerstandsoptimierung von Schiffsrümpfen

Drag Optimisation of Ship Shapes (DRoPSS)

N. Kühl, T. Rung, Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie, Technische Universität Hamburg-Harburg

Kurzgefasst

- Schiffe sind an etwa 90% des globalen Handels beteiligt.
- Zielgerichtete (adjungierte) Optimierung ermöglicht eine rasche Verbesserung der Schiffsförmung.
- Der Sprung von Fluideigenschaften resultiert in enormen (numerischen) Problemen innerhalb des adjungierten Systems. Ziel dieses Vorhabens ist die Untersuchung von Stabilisierungsmaßnahmen an Schiffen bei realen Betriebspunkten.
- Änderungen an der Rumpfförmung haben einen direkten Einfluss auf die (Schwimm)-Physik des Schiffes, sodass eine veränderliche Schwimmhöhe innerhalb dieses Vorhabens untersucht werden soll.

Etwa 90% des globalen Handels stützt sich auf Seetransport. Die Dominanz des Seeverkehrs im Bereich des Handelstransports ist durch die sehr niedrigen Transportkosten pro km und Tonne begründet. Die Welthandelsflotte umfasst ca. 45-50 tausend Schiffe, die insgesamt signifikant zur globalen Umweltbelastung beitragen und deren Betrieb einen beachtlichen wirtschaftlichen bzw. finanziellen Aufwand erfordert. Aus diesen Gründen steht der Seeverkehr im Zentrum vieler unterschiedlicher Optimierungsbemühungen. Die schiffsinduzierte Umweltbelastung und etwa 50% der direkten Betriebskosten von Handelsschiffen hängen vom Brennstoffverbrauch ab. Dieser ist maßgeblich vom hydrodynamischen Widerstand des Schiffes beeinflusst, welcher größtenteils (ca. 75%) aus dem stationären Reibungs- und Wellenwiderstand entlang der benetzten Oberfläche besteht. Selbst für kleinste Verbesserungen sind wissenbasierte Strategien zur Reduktion dieser Widerstandsbeiträge sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus umweltpolitischen Gründen sehr willkommen.

Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Vorhaben befasst sich mit der Weiterentwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur hydrodynamischen Optimierung von Schiffsrümpfen bei Zweiphasenströmung. Dazu wird der am Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie der TUHH entwickelte Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Löser FreSCo⁺ entsprechend weiterentwickelt. Es handelt sich um eine effiziente,

parallelisierte numerische Finite-Volumen-Methode (FVM) zur primalen sowie dualen (adjungierten) Simulation turbulent strömender, viskoser Medien mit integrierten Modulen zur automatischen Formänderung und zum automatischen Gitterupdate. Die geförderten Arbeiten beschränken sich auf gradientengestützte, adjungierte Optimierungsmethoden und CAD-freie bzw. parameterfreie Formbeschreibungen. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung einer robusten sowie effizienten Prozesskette unter ganzheitlicher Berücksichtigung aller praxisrelevanten hydrodynamischen Effekte und Bedingungen. Grundlage der Entwicklungen sind kontinuierlich adjungierte Theorien zur Sensitivitätsanalyse in komplexen viskosen Mehrphasenströmungen. Primäre wissenschaftliche Ziele des geplanten Vorhabens sind die Entwicklung eines diffusiven Mehrphasenmodells bei der Formulierung des adjungierten Strömungssimulationsverfahrens, die Betrachtung der veränderlichen Schwimmhöhe im Optimierungsprozess sowie eine reduzierte adjungierte Turbulenzmodellierung. Die Anwendungen konzentrieren sich auf völlige Offshore-Versorgungsschiffe und ein vielfach untersuchtes Containerschiff bei Froude- und Reynolds-Zahlen von praktischem Interesse.

Optimierungsprobleme mit freier Oberfläche sind mit Hilfe von klassischen Volume-of-Fluid (VoF) Verfahren nur schwer adressierbar. Auf Grund der Unstetigkeit der Dichte durch den Phasensprung, welcher im strengen Sinne ein Differenzierbarkeitsproblem darstellt, sowie den vielen zusätzlichen Kopplungstermen, entstehen Probleme die vor allem numerischer Natur sind. In einem ersten Projektab-

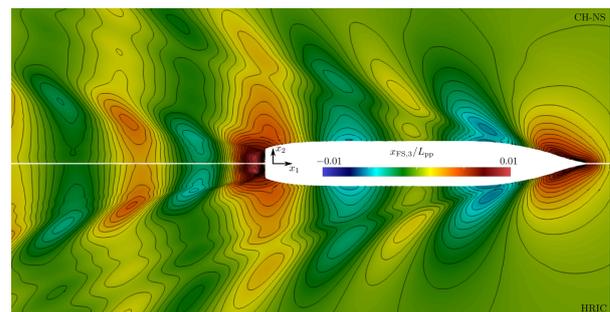


Abbildung 1: Wellenbild um ein Kriso Containerschiff (KCS) bei realen Reynolds- und Froude Zahlen simuliert mit zwei unterschiedlichen Ansätzen: Unten auf Basis eines klassischen High Resolution Interface Capturing (HRIC) Schemas innerhalb eines Volume-of-Fluid Verfahrens sowie oben mit Hilfe eines Cahn-Hilliard Navier-Stokes Ansatzes.

schnitt wurde das primale/duale Mehrphasensystem auf seine Konsistenz sowie die notwendige

Robustheit optimiert. Letzteres geschieht auf Basis von Cahn-Hilliard Techniken, welche auf Grund von zusätzlichen Modellparametern einen konsistenten Kompromiss zwischen Rechenzeit und Robustheit ermöglichen, was schlussendlich in einem deutlichen Performancegewinn der Optimierung resultiert. Letzterer wird zu einem beträchtlichen Anteil auf der primalen (physikalischen) Seite erzielt, da der diffusive Cahn-Hilliard Navier-Stokes (CHNS) keine direkte Zeitschrittabhängigkeit aufweist. Abbildung 1 zeigt zwei Wellenbilder um ein Kriso Containerschiff (KCS) bei realen Reynolds- und Froude Zahlen, wobei unterschiedliche Verfahren zur Behandlung der freien Wasseroberfläche verwendet wurden. Mit Hilfe des neu implementierten CHNS Ansatzes konnte die Simulationszeit auf dem HLRN-III Rechner im Vergleich zum klassischen VoF Verfahren um eine Größenordnung reduziert werden [5].

Bei bisherigen Formoptimierungen von schwimmenden Körpern wurde eine Schwimmlageänderung innerhalb des Optimierungsprozesses nicht betrachtet. Abbildung 2 zeigt ein schwimmendes KCS mit der sich einstellenden freien Oberfläche sowie das verwendete numerische Gitter. Selbst wenn die Optimierung bei einer korrekten Anfangsschwimmlage startet, so ist das aktuelle Verfahren nicht in der Lage, mögliche Schwimmlageänderungen auf Grund von Formmodifikationen zu erfassen. Dies resultiert in einem Einbruch der sehr beachtlichen Optimierungserträge. Die Leitidee des ganzheitlichen Optimierungsprozesses greift dieses Problem auf, indem nicht nur die Physik der Fluide (Wasser/Luft) sondern auch die des Schiffes in der Prozesskette betrachtet wird. Die Bewegungsgleichungen des schwimmenden Schiffes, welche als gewöhnliche Differentialgleichungen auf Grund der Annahme eines starren Körpers auftreten, werden mit Hilfe eines Schwimmlagemoduls für jede –bessere– Form gelöst, um so die Änderungen der Schwimmlage einer jeden neuen Form zu erfassen. Von den sechs möglichen Freiheitsgraden wurden im bisherigen Projektverlauf sowohl die Trimmung als auch die Tauchung als kritische Größen identifiziert.

Für einphasige Strömungen ähnelt das adjungierte Gleichungssystem den physikalischen Erhaltungsgleichungen vergleichsweise stark. Jedoch bläht der Übergang in eine mehrphasige Problemstellung das adjungierte System auf Grund der notwendigen Differentiation der nun variablen Stoffeigenschaften deutlich auf. Da das übergeordnete Ziel der adjungierten Strömungsanalyse in der Bestimmung der Formableitung bezüglich integraler Kostenfunktionale liegt, offenbart sich die Frage nach dem Einfluss der zusätzlichen Kopplungsterme auf die integrale Sensitivität, vor allem für Anwendungen von praktischer Relevanz. Der Einfluss eines jeden Terms soll systematisch untersucht werden. Kriterien zur

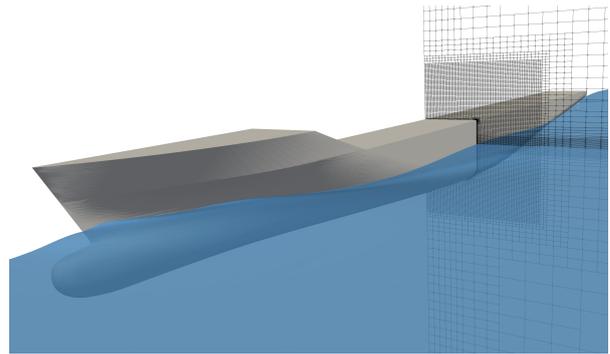


Abbildung 2: Auskonvergierte freie Oberfläche inklusive Rechengitter um ein Kriso Containerschiff (KCS) bei realen Reynolds- und Froude Zahlen.

Beurteilung sind die (initiale) integrale Formensensitivität, das (finale) integrale Zielfunktional sowie der qualitative Verlauf des Zielfunctionals während der Optimierung. Letztere wird mit Hilfe eines CAD-freien Gradientenverfahrens unter Verwendung der immergleichen Oberflächenmetrik durchgeführt [3].

WWW

<http://www.tuhh.de/fds>

Weitere Informationen

- [1] Kröger, J., Kühl, N., Rung, T. Adjoint Volume-of-Fluid Approaches for the Hydrodynamic Optimisation of Ships. *Ship Technology Research* (2018) 65, pp. 47 – 68 doi: 10.1080/09377255.2017.1411001
- [2] Kröger, J. A Numerical Process for the Hydrodynamic Optimisation of Ships. PhD thesis, Hamburg University of Technology, 2016
- [3] Kröger, J., Rung, T. Cad-free hydrodynamic optimisation using consistent kernel-based sensitivity filtering. *Ship Technology Research* (2015) 62, pp. 111 – 130 doi: 10.1080/09377255.2015.1109872
- [4] A. Stück. Adjoint Navier-Stokes Methods for Hydrodynamic Shape Optimisation. PhD thesis, Hamburg University of Technology, 2012.
- [5] N. Kühl, M. Hinze, and T. Rung. Cahn-Hilliard Navier-Stokes Simulations for Marine Free-Surface Flows. arXiv preprint arXiv:2002.04885, 2020.

Projektpartner

U. Hamburg, Department für Mathematik
U. Koblenz-Landau, Mathematisches Institut

Förderung

DFG - 397665118