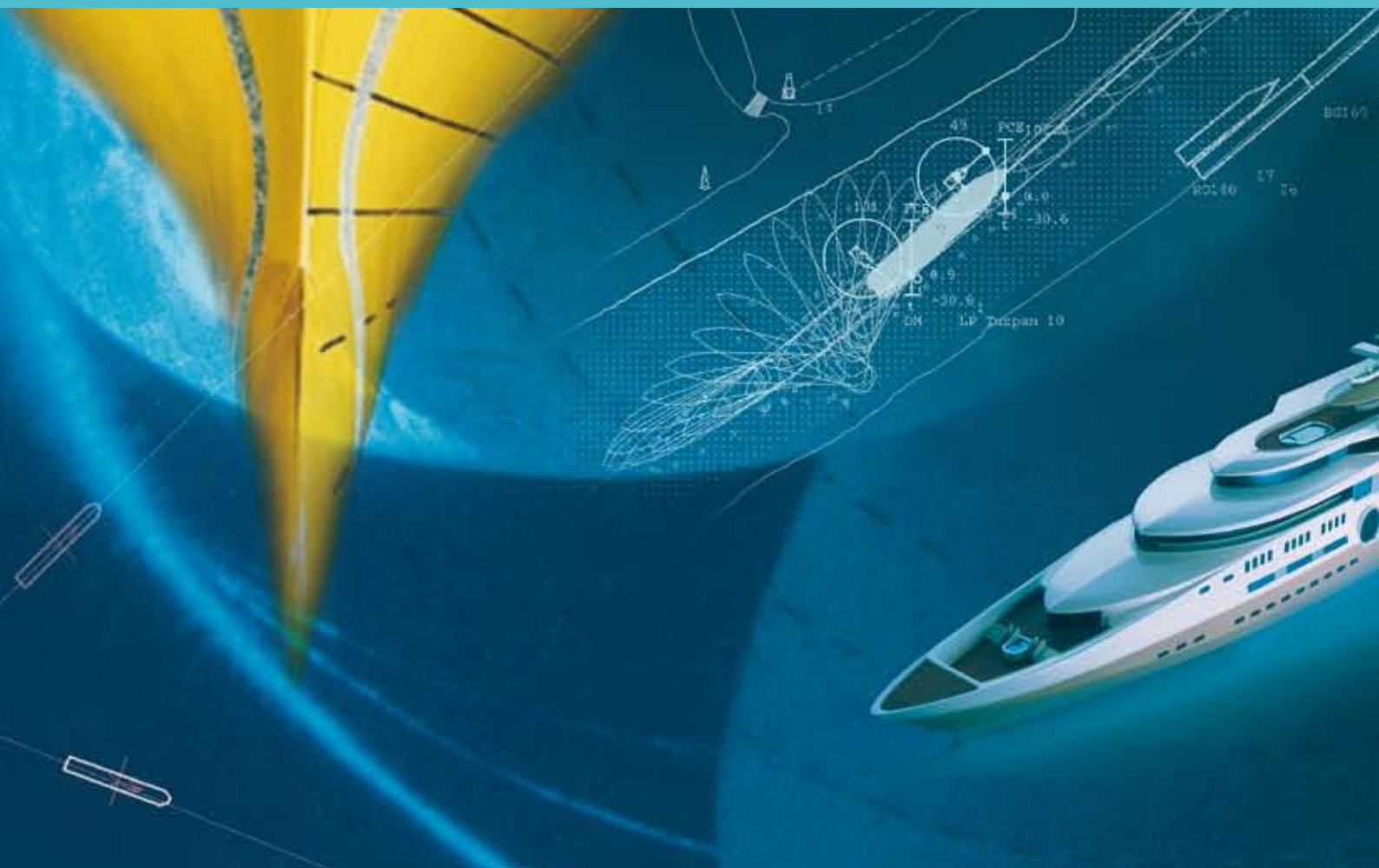


Dritter Interdisziplinärer Workshop Maritime Systeme

Aktuelle Ergebnisse aus laufenden Promotionsprojekten an der TUHH



TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Dritter Interdisziplinärer Workshop Maritime Systeme

Aktuelle Ergebnisse aus laufenden Promotionsprojekten an der TUHH

Hamburg, 23. August 2011

Impressum

Herausgeber

Forschungsschwerpunkt Maritime Systeme der TUHH

Redaktion

Hendrik Dankowski, Nicolas Rox

Gestaltung

Formlabor, Hamburg

Inhalt

Martin Heinig

Unterstützung von Montageaufgaben in der Unikatproduktion mit dem ViP-Toolset 1

Hendrik Dankowski

Eine schnelle, direkte Methode zur Simulation von Flutungs- und Sinkvorgängen
von Schiffen 12

Lennart Pundt

Development of an onboard trial trip analysis tool 22

Katja Wöckner-Kluwe

Investigation of the Propeller-Ventilation Phenomena with Viscous-Flow Methods 35

Jörg Brunswig

RANSE Berechnungen mit der Methode der überlappenden Gitter 45

Unterstützung von Montageaufgaben in der Unikatproduktion mit dem ViP-Toolset

Prof. Dr.-Ing. habil. Hermann Lödding, Dr.-Ing. Axel Friedewald,

Dipl.-Wirtsch.-Inf. Martin Heinig

Institut für Produktionsmanagement und –technik
Technische Universität Hamburg-Harburg
Denickestraße 17 (L)
21073 Hamburg
e-mail: heinig@tu-harburg.de

1 Einleitung

Ausrüstungsmontage und Refit in der maritimen Industrie sind durch eine hohe Komplexität und zahlreiche manuelle Montagearbeiten gekennzeichnet. Für die Gewährleistung einer fehlerfreien und schnellen Montage ist zum einen eine gute Montageplanung notwendig, zum anderen muss der Werker für die Montageausführung mit den benötigten Informationen versorgt werden. Diese liegen zum Teil in digitaler Form in den verschiedenen DV-Systemen, sind aber vor Ort entweder nicht verfügbar oder nicht komfortabel zugänglich.

Das am IPMT entwickelte Virtual Production (ViP) Toolset umfasst Methoden und Hilfsmittel, mit denen die besonderen Probleme der Montage in der Unikatproduktion berücksichtigt werden. Die Montageplanung wird mit dem ViP-Composer unterstützt. Er enthält einen Mechanismus zur Verknüpfung von Metadaten mit 3D-Modelldaten und ermöglicht die automatische Bauteilselektion und Modellaufbereitung beispielsweise anhand von Terminen. Die Montageplanung kann nun in Virtual Reality (VR) erfolgen, für die Unterstützung der Montageausführung muss das vorhandene Toolset erweitert werden.

Ein Lösungsansatz ist die Verwendung von Augmented Reality (AR). Diese bisher in der Serienfertigung prototypisch eingesetzte Technologie ermöglicht die Anzeige von Informationen eingebettet in ein Bild oder Video. Mögliche Endgeräte können dabei AR-Brillen, Tablet-PCs oder Smartphones sein, die portabel sind und somit vor Ort benutzt werden können. Der Bezug zu den anzuzeigenden Informationen kann entweder über die geografische Position des Endgerätes stattfinden oder über die Erkennung eines von der Kamera erfassten Markers erfolgen.

Der neu entwickelte Prototyp ist eine Erweiterung des bestehenden Virtual Production Toolsets. Für die situationsgerechte Anzeige von Informationen wurde eine Schnittstelle implementiert, mit der die im ViP-Composer verknüpften Meta- und Modelldaten zugänglich werden. Hierfür werden Bauteile markergestützt identifiziert und können als Geometrie mit den notwendigen Informationen auf einem Tablet-PC angezeigt werden.

2 Montageplanung mit Virtual Reality

Die Grundlage für einen erfolgreichen Einsatz der VR-Technologie bildet die Anpassung des VR-Systems an die Geschäftsprozesse [Nedeß et al. 2005], [Bohuszewicz 2007]. Um dieses Ziel zu erreichen wurde ein VR-Prozessmodell für den Schiffbau entwickelt [Nedeß et al. 2008, 2009a], welches sich in sechs Phasen untergliedert (Abbildung 1). Dieses Modell besitzt auch für Augmented Reality Gültigkeit, was im Folgenden aber nicht explizit aufgegriffen wird.

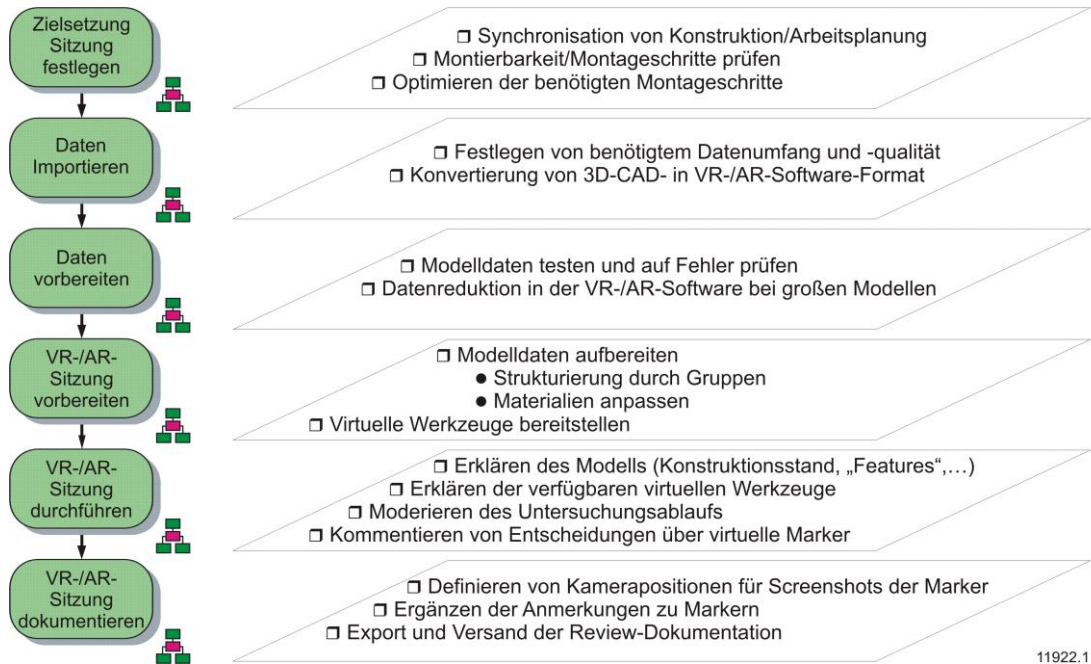


Abbildung 1: Geschäftsprozeß Virtual/Augmented Reality - Sitzung

Die Phasen 1-4 beschreiben die Vorbereitung einer VR-Sitzung, in Phase 5 wird das aktuelle Meeting durchgeführt und Phase 6 umfaßt die Ergebnisdokumentation. Diese Einteilung zeigt die hohe Bedeutung der Meeting-Vorbereitung für den gesamten VR-Prozess. Dabei erfordert der Einsatz von unveränderten Standard VR-Systemen viele manuelle Tätigkeiten während sämtlicher Phasen dieses Prozesses. Dies hängt mit der Auswahl der notwendigen Produktmodellkomponenten zusammen, welche signifikant von der Zielsetzung der Sitzung beeinflusst werden. Die Nutzung und Visualisierung von Metadaten kann die Durchführung einer VR-Sitzung vereinfachen und beschleunigen. Die notwendige Unterstützung ist bisher allerdings noch nicht zufriedenstellend realisiert [Nedeß et al. 2008], weshalb eine verbesserte Lösung für den Import, die Anzeige und die Anwendung von Metadaten im Kontext der VR-Session entwickelt wird.

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags geförderten Projekt POWER-VR arbeiten mehrere Werften, Zulieferer und Forschungsinstitute zusammen. Ein Szenario in diesem Projekt ist die verspätete Lieferung von Komponenten, welches die Umplanung der Montagesequenz in einem bestimmten Bereich zur Folge hat (Abbildung 2).

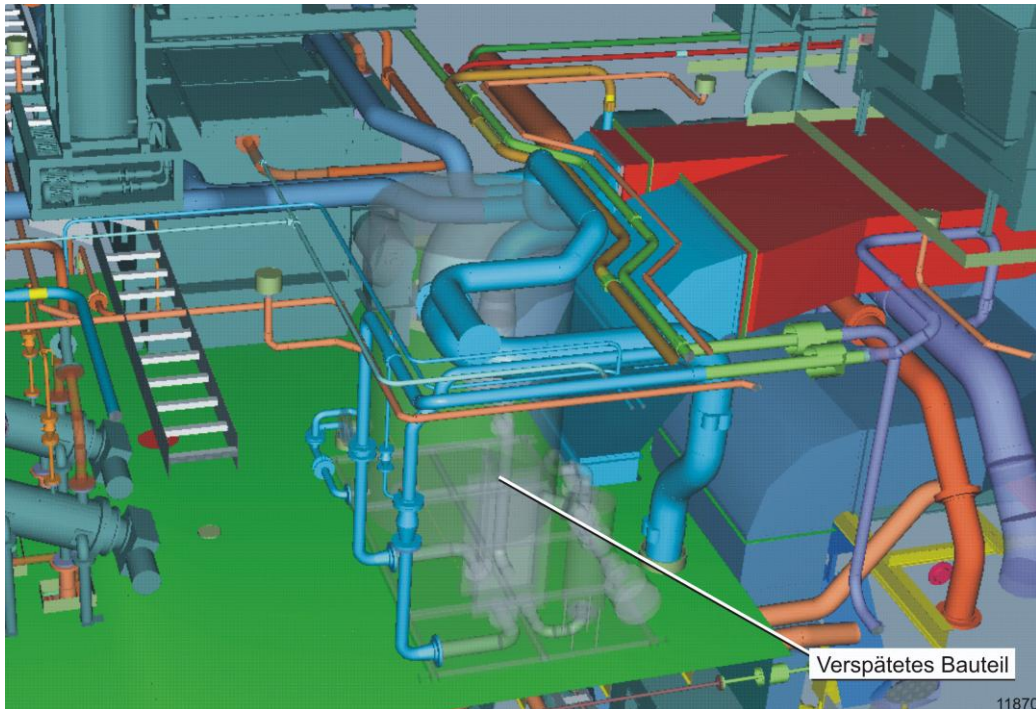


Abbildung 2: Szenario „Verspätetes Bauteil“ [Lödding et al. 2011]

Untersuchungen haben gezeigt, dass marktgängige VR-Software keine ausreichende Unterstützung für diese Umplanungs Aufgabe anbietet, da geeignete Methoden der Modellvorbereitung und –handhabung fehlen. Um jedoch das Planungsergebnis durch den Einsatz von VR-Reviews verbessern zu können ist eine Unterstützung spezifischer Planungsaufgaben in der VR-Session notwendig, andernfalls würde der Aufwand den Nutzen weit übersteigen. Das Ziel dabei ist die Definition einer neuen Montagefolge, die eine kollisionsfreie Montage der verspäteten Komponente durch Identifikation und Umplanung derjenigen Teile erlaubt, die zwischen dem geplanten und dem neuen Lieferdatum verbaut und dadurch einen alternativen Montagepfad blockieren würden.

Die Grundlage der VR-Untersuchung ist das 3D-CAD-Modell. Es enthält alle Komponenten in der endgültigen Montageposition, verweist aber nicht auf Bauzustände, Montagepfade oder Montagefolgen. Im Vergleich zur erstmaligen Montageplanung ist die Modellvorbereitung wesentlich komplexer, da das Modell auf den spezifischen Montagebereich reduziert werden muss und dieser nur noch die bereits verbauten Komponenten umfassen darf. Die bisherige manuelle Selektion der Teile ist sehr zeitintensiv und fehleranfällig. Um eine automatische Sitzungsvorbereitung zu erreichen ist eine Verknüpfung des 3D-Modells mit Metadaten erforderlich, welche zusätzlich die Montagefolge und die Lieferzustände der Komponenten enthalten. Darüber hinaus ist die Darstellung unterschiedlicher Montagezustände sinnvoll. Planungsinformationen wie z.B. Liefer- und Montagetermine müssen für die Modellaufbereitung nutzbar und während der VR-Sitzung verfügbar sein.

Damit der Anwender leichter einen Nutzen aus den Erweiterungen der Software ziehen kann, muss er durch die VR-Sitzung geführt werden. Dies geschieht, indem ihm zusätzliche Informationen wie beispielsweise der folgende Montageschritt oder Informationen zu den Bauteilen wie Gewichte und andere Eigenschaften aufgezeigt werden. Ebenso sind Werkzeuge zur Umplanung erforderlich, die das Finden und Validieren des neuen Montagepfades erleichtern. Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht bisher durch eine personelle Randbedingung: In der Regel muss der Fachexperte, der als potentieller VR-Anwender meist keine vertieften VR-Kenntnisse aufweist, die Zielsetzung der Untersuchung dem VR-Experten verdeutlichen, damit dieser die Sitzung vorbereiten kann. Ein praxisgerechterer Lösungsansatz wäre, den VR-Anwender die fachlichen Aspekte der VR-Untersuchung selbst

vorbereiten zu lassen, wodurch der VR-Experte nur noch für spezielle VR-Probleme benötigt wird. Der gleiche Ansatz ist für die Durchführung der Sitzung von Bedeutung, wenn Änderungen der VR-Szene wie z.B. das Nachladen einer zusätzlichen Schiffssektion oder die Anpassung der Montagefolge in VR erforderlich werden. Um diese Diskrepanz zu beseitigen ist ein erweitertes Steuerungskonzept notwendig, welches dem VR-Anwender eine höhere Funktionalität für spezifische Montageaufgaben zur Verfügung stellt.

3 Virtual Production Workflow-Composer

Um den gesamten VR-Prozess mit all seinen Phasen zu unterstützen, wurde der Virtual Production Workflow-Composer (ViP-Composer) entwickelt [Nedeß et al. 2009b]. Der ViP-Composer verwendet spezifische Engineering-Vorlagen, sog. Templates, für die Anpassung der Software und unterstützt außerdem den Anwender bei der Durchführung der VR-Sitzung. Dadurch sollen auch Fachabteilungen ohne vertiefte VR-Kenntnisse diese Technologie nutzen können.

Aus dem Szenario „Verspätete Bauteile“ ergibt sich die Anforderung, dass die Flexibilität der VR-Sitzung verbessert werden muss. Dies beschreibt die Möglichkeit, auch nach Beginn der Untersuchung Änderungen am Modell oder an der VR-Szene einfach vornehmen zu können. Der vorhandene ViP-Composer erlaubte keine derartige dynamische Sitzungsgestaltung. Die erste Version unterstützte die Anpassung der Bedienermenüs der VR-Software, ohne jedoch eine Modell-Aufbereitung zu ermöglichen. Diese musste manuell vorgenommen werden und es gab keine Möglichkeit von dynamischen Änderungen oder automatischer Anpassung an eine veränderte Sitzungszielsetzung.

Für die Nutzung mit VR werden die vorhandenen 3D-CAD-Modelle des Schiffs in ein spezielles Datenformat konvertiert. Die Fehlerfreiheit und die Vollständigkeit des Modells sind dazu im Vorwege sicherzustellen. Ein Modell besteht in der Regel aus mehreren tausend Dateien, die über statische Beziehungen wie Dateiname, Stellung in der Modellhierarchie oder Modellkoordinaten verknüpft sind. Metadaten erlauben weitere Beziehungen zwischen den Modellelementen und können diese zusätzlich nach spezifischen Attributen wie bspw. Montageterminen gruppieren. Die direkte Einbindung in die Geometriedaten ist allerdings nur für statische Metadaten sinnvoll. Um dynamische Metadaten mit den Modelldaten zu verbinden ist ein anderer Ansatz mit einer flexiblen Kopplung notwendig, damit eine Veränderung der Metainformationen nicht eine neue Revision der Modelldaten erfordert. Der erweiterte ViP-Composer greift diesen Ansatz auf und verknüpft Metadaten und Modelldaten dynamisch während der VR-Sitzung (Abbildung 3).

Die Voraussetzung dafür ist eine aggregierte und aktuelle Datenbank und das Vorhandensein eines einheitlichen Schlüssels, um Metainformationen mit den Modelldaten zu verknüpfen. Die Metadaten werden in den Composer geladen und mit den Modellobjekten des VR-Szenegraphen mit Hilfe dieses Schlüssels, z.B. der Bauteilnummer oder Bauteilbezeichnung, verbunden. Ändern sich die Metadaten im Laufe der Zeit, aktualisiert ein erneutes Laden die bereits verknüpften Daten. Die Metadaten sind nun während der Sitzung verfügbar und können zusätzlich angezeigt werden. Dadurch steigt nicht nur der Informationsgehalt, vielmehr können jetzt Modellelemente anhand dynamischer Attribute selektiert und das Modell während der Sitzung anhand dieser Daten automatisch angepasst werden.

Die **Vorbereitung der VR-Sitzung** umfasst in diesem Beispiel die Kombination von zwei Filtern und der Aktion „Montagereihenfolge“. Zwar wurden in der vorangegangenen Phase alle relevanten Komponenten in die Sitzung geladen, dennoch ist das Modell noch nicht für die Untersuchung einer Montagefolge vorbereitet. Die beiden Filter wählen alle Teile aus, die zwischen dem geplanten Montagetermin des verspäteten Bauteils und dem neu geplanten Montagetermin liegen. Die „Montagereihenfolge“-Aktion stellt das Ergebnis als Reihenfolgetabelle zur Verfügung, geordnet anhand der geplanten Montagetermine. Die Aktion bereitet die Teile außerdem für die Kollisionskontrolle in der VR-Software vor und schaltet das verspätete Bauteil für eine bessere Übersicht transparent. Der Anwender kann jetzt **die VR-Sitzung durchführen** und die Animation der Montagefolge betrachten. Er sieht, welche Komponente verspätet ist und kann die Animation jederzeit anhalten, um eine Demontage des Bauteils mit Kollisionskontrolle durchzuführen. Weiterhin ist mit einem zusätzlichen Steuerungsmenü eine schrittweise Animation sowohl vorwärts als auch rückwärts durchführbar. Die Montagereihenfolge ist über die Reihenfolgetabelle veränderbar, so dass eine neue Montagefolge sofort sichtbar ist und auf Kollisionen überprüft werden kann. Das Umplanungsergebnis ist somit umgehend validierbar (Abbildung 4).

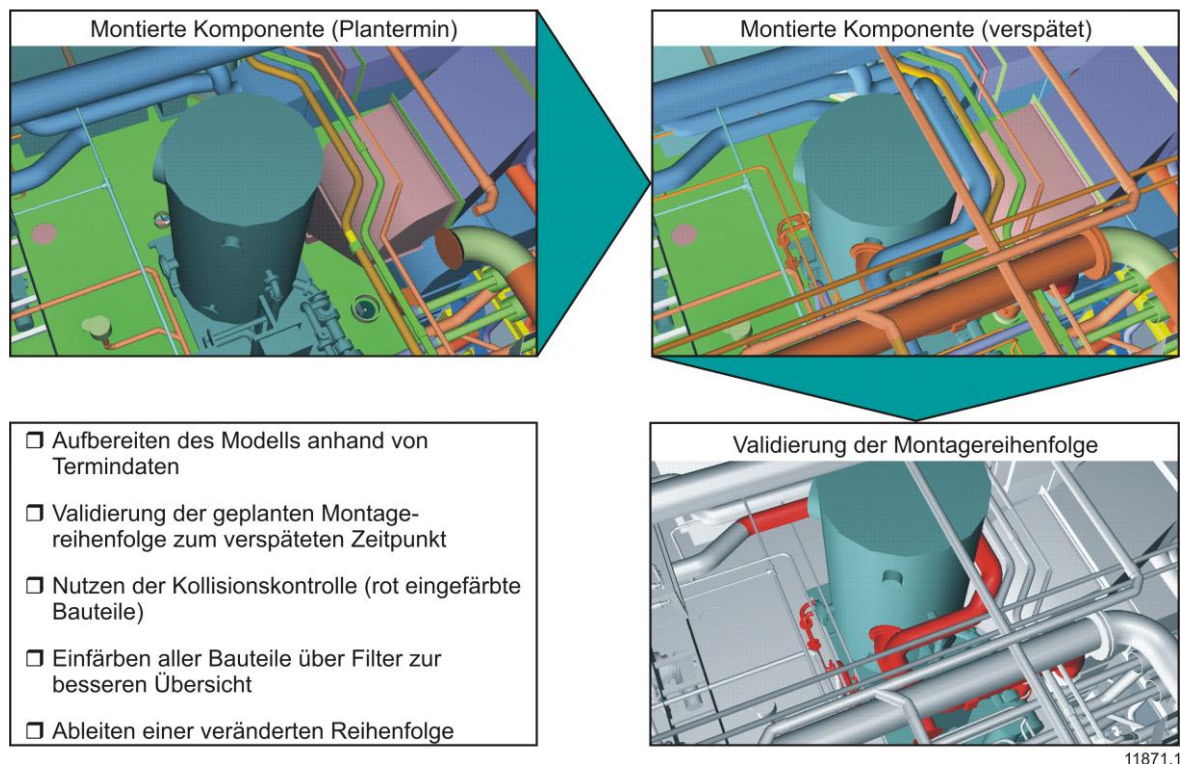


Abbildung 4: Visualisierung von Montagesituationen [Lödding et al. 2011]

Enthalten die Metadaten ergänzende Informationen zu einer bestimmten Komponente, werden diese in der dreidimensionalen Szene angezeigt. Wie in der Szenariobeschreibung dargestellt, ist eine dynamische Session erforderlich, falls ergänzende Modellelemente benötigt oder Metadaten verändert werden. Daher sind während der gesamten VR-Sitzung ein Aktualisieren von Metadaten ebenso wie Filteranpassungen möglich. In der letzten Phase erfolgt die **Dokumentation** der erzielten Ergebnisse. Die neu gefundene Montagereihenfolge wird in der VR-Szene selbst als Animation dokumentiert und zusätzlich in der Reihenfolgetabelle gespeichert. Sie kann in Form von Metadaten gesichert und leicht weitergegeben werden. Um eine den Anforderungen entsprechende komfortablere Steuerung des Composers zu erreichen, wurde zusätzlich das Interaktionskonzept erweitert. Dies wird im Folgenden erläutert.

3.2 Erweitertes Interaktionskonzept

Wie in Kapitel 2 beschrieben soll der ViP-Composer auch für Nicht-VR-Spezialisten einfach zu bedienen sein. Hierfür wurden sogenannte Templates implementiert, durch die der Anwender eine für seine Untersuchungen notwendige Vorkonfiguration erhält. Der ViP-Composer unterscheidet zwischen fachlichen und VR-spezifischen Templates. Die fachlichen Templates beinhalten die zielabhängig notwendigen Filter und Aktionen. Sie stellen sowohl die Kollisionskontrolle zur Verfügung als auch die Möglichkeit zur Visualisierung und Änderung der Montagefolge. Die VR-spezifischen Templates stellen vordefinierte Menükonfigurationen und zusätzliche Hilfsmittel wie Krangeometrien oder Optimierungstools bereit, die während der VR-Sitzung erforderlich werden können, aber nicht direkt mit den Untersuchungszielen verknüpft sind [Nedeß et al. 2008]. Abbildung 5 veranschaulicht das Konzept des erweiterten ViP-Composers zur Nutzung von Metadaten und verdeutlicht die Benutzung der Templates.

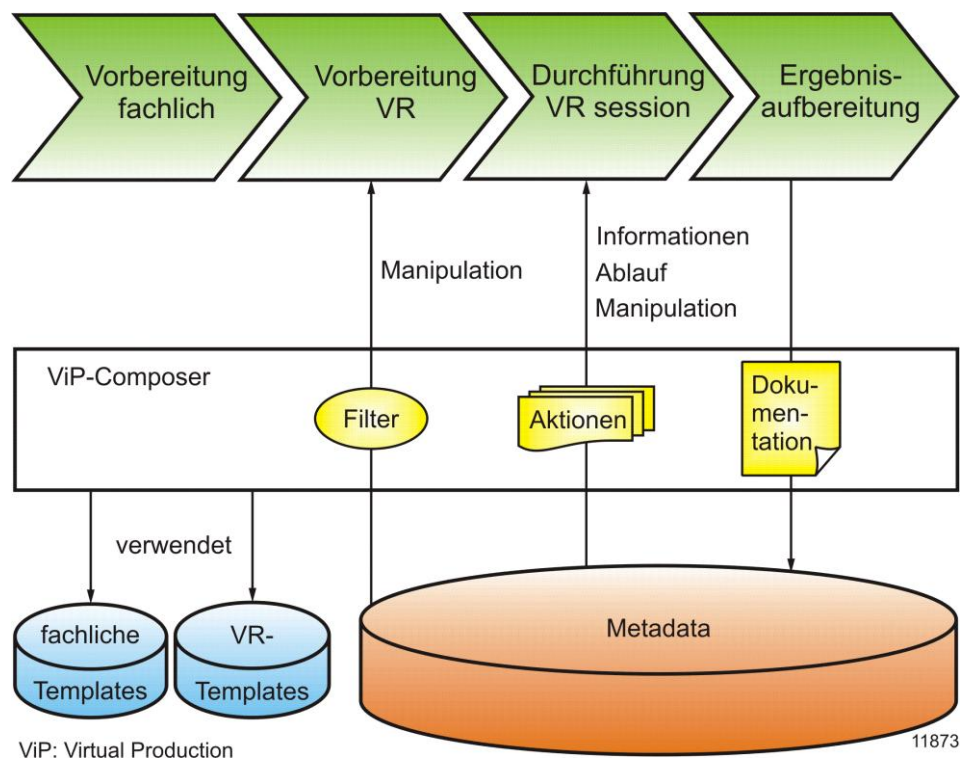


Abbildung 5: Erweiterter ViP-Composer [Lödding et al. 2011]

Wie von [Lödding et al. 2010] aufgezeigt ist die Unterteilung der Templates notwendig, da der Fach-Anwender eines Werkzeugs nicht immer auch Experte für dieses Werkzeug ist. Meistens unterstützt ein VR-Experte den VR-Anwender bei der Durchführung des Meetings, wobei er den fachlichen Kontext der Untersuchung nicht ebenso tiefgehend beherrscht und deshalb die Hilfe nur so gut sein kann wie die Kommunikation zwischen den beiden. Deswegen muss auch der VR-Anwender in die Lage versetzt werden, die Sitzung vorzubereiten und durchzuführen.

Dieser Ansatz wurde mit einem VR-Baukasten umgesetzt, der Templates mit definierten Konfigurationen für VR-Sitzungen vorhält [Nedeß et al. 2009b]. Zur Meeting-Vorbereitung belegt der VR-Anwender die ausgewählten Templates mit spezifischen Werten und kann später die Software mit konfigurierten Menüs und erweiterten Hilfsmitteln bedienen. Das konventionelle Desktop-Setup mit Tastatur und Maus erlaubt notwendige Interaktionen. Während der Sitzung arbeitet der VR-Anwender immersiv mit einem sog. Flystick. Dieses Gerät bietet eine Auswahl an Funktionen über die vordefinierten Menüs, bleibt allerdings auf statische Menüelemente beschränkt und bietet keine

komfortable Möglichkeit für Parametereingaben oder das Auslösen komplexer Befehle. Übertragen auf das Filterkonzept des erweiterten ViP-Composers heißt das, dass ein Filter nur aktiviert oder deaktiviert werden kann. Die Parameter, z. B. die Montagetermine, könnten nicht immersiv geändert werden. Dies hätte entweder das Verlassen der immersiven VR-Umgebung oder ein Delegieren der gewünschten Eingaben an eine zweite Person am PC zur Folge, was beides die Untersuchung behindert. Das neu entwickelte erweiterte Interaktionskonzept soll diesen Mangel beseitigen (Abbildung 6).

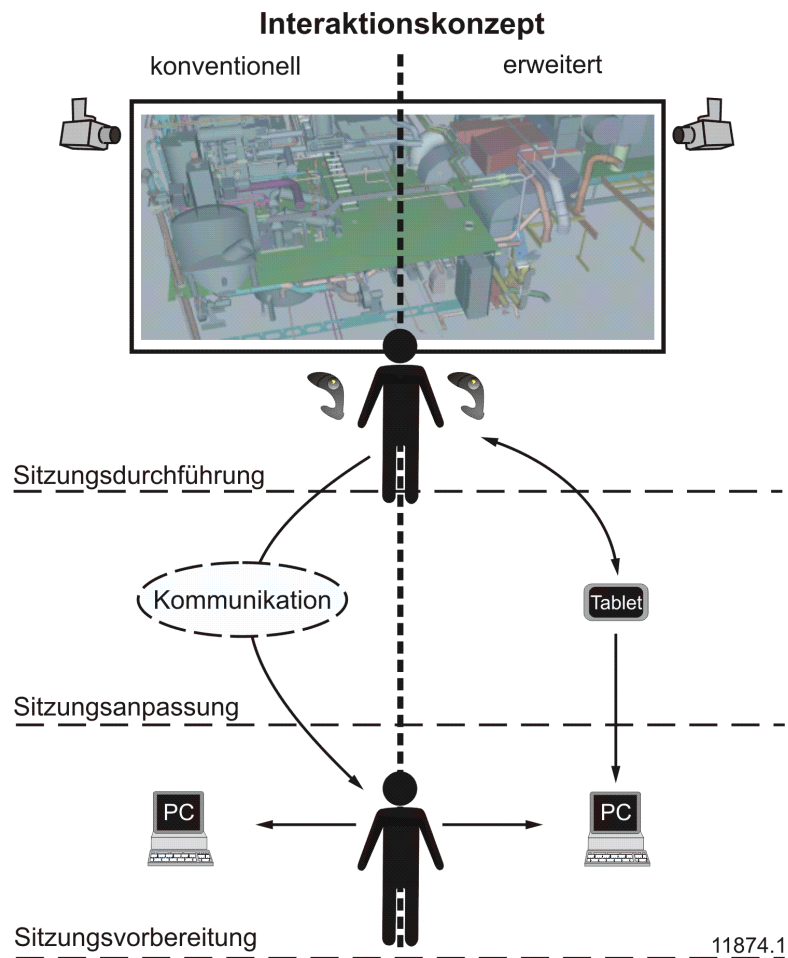


Abbildung 6: Erweitertes Interaktionskonzept [Lödding et al. 2011]

Den Anforderungen an das neue Konzept liegt die Vorstellung einer dynamischen immersiven VR-Bedienung zugrunde. Ein VR-Anwender soll in die Lage versetzt werden, die aktuelle Sitzung selbst zu verändern, ohne die immersive Umgebung zu verlassen. Neue Interaktionsgeräte müssen dazu tragbar und leicht sein. Sie sollen die Möglichkeit bieten, Befehle oder Text einzugeben und ergänzende Informationen darzustellen, die nicht in der 3D-Szene angezeigt werden. Eine gute Unterstützung stellt zusätzlich der einfache Zugriff auf regelmäßig genutzte Funktionen oder Menüs dar. Dies kann ohne Verwendung des immersiven Menüs geschehen und bietet personalisierte Anpassungen je nach Anwender. Dies bedeutet zum einen einen Geschwindigkeitszuwachs und hat zum anderen den Vorteil, dass das 3D-Modell z.B. bei einer Animation nicht durch das immersive Menü verdeckt wird. Weitere Anforderungen können eine Sprachsteuerung für einfache und schnelle Texteingaben sein oder die Verwendung eines Lagesensors zur Navigation in der 3D-Szene. Insbesondere die intuitive Handhabbarkeit mit dem Touchscreen führte zur Auswahl eines Tablet-Computers für das hier vorgestellte Konzept.

Im Gegensatz zur „konventionellen“ Bedienung während der VR-Sitzung ermöglicht der Tablet-Computer die Steuerung der ViP-Composer-Funktionen in der immersiven Umgebung. Die zur Sitzungsvorbereitung festgelegten Filter und Aktionen sind während des Meetings veränderbar. Es können notwendige Parameter eingegeben oder andere Aktionen selektiert werden. Dies ist immer dann von Bedeutung, wenn die Sitzung aus dem vorbereiteten Anfangszustand verändert werden soll, z.B. wenn zusätzliche Bauteile nachgeladen werden müssen. Metadaten können als zusätzliche Information am Tablet-Computer angezeigt werden, wodurch das immersive Blickfeld des Benutzers für andere Elemente frei bleibt. Auch die Funktionen der Montageplanung wie Starten und Anhalten der Montagefolgenanimation können über den berührungsempfindlichen Bildschirm bequem gesteuert werden. Sie müssen nicht mehr über das immersive Menü ausgelöst werden und behindern damit nicht die fortlaufende Animation. Die Verwendung des Tablet-Computers ist intuitiv und erfordert kein spezielles VR-Wissen. Ebenso können die Montagetermine über den Tablet-Computer umterminiert werden.

4 Montageunterstützung mit Augmented Reality

Nach Abschluss der Montageplanung mit VR kann der Werker mit der Montage beginnen. Die notwendigen Informationen zur Ausführung der einzelnen Tätigkeiten entnimmt er unter Nutzung seines Erfahrungswissens oftmals aus Papierdokumenten. Dabei handelt es sich z.B. um 2D-Zeichnungen, Stücklisten oder Tabellen mit Montagereihenfolgen. Dieser Umstand führt allerdings zu unterschiedlichen Problemen, die eine schnelle und fehlerfreie Montage gefährden. Das Erfahrungswissen des Werkers kann unvollständig sein, oder er vergisst wichtige Ausführungsschritte. Die Papierdokumente sind in Ihrer Benutzung meist unkomfortabel. In 2D-Zeichnungen ist es schwierig, sich die räumlichen Gegebenheiten vorzustellen und bei komplexen Montagesituationen kann der Umfang der Dokumente das schnelle Finden der benötigten Informationen verhindern. Auch das gezielte Suchen ist in analogen Dokumenten nicht rechnerunterstützt möglich. Daher ist es sinnvoll, wenn der Werker die für ihn relevanten Informationen automatisch zur Verfügung gestellt bekommt. Diese Montageinformationen müssen ortsbezogen sein und für den jeweiligen Kontext aufbereitet werden. Beispielsweise kann das schrittweise Anzeigen der Montagereihenfolge den Werker unterstützen und ihm Informationen zu Werkzeugen oder Anschlusspunkten liefern.

Die Anzeige von digitalen Informationen vor Ort ist mit Augmented Reality (AR) umsetzbar. Bei dieser Technologie werden virtuelle Objekte in das Sichtfeld des Benutzers eingebettet [Milgram 1994]. Es können Text und 3D-Modelle angezeigt werden, wodurch beispielsweise die Darstellung eines noch nicht montierten Bauteils am Verbauort möglich ist. Es existiert eine Vielzahl von verschiedenen Anzeigegeräten, die sich hinsichtlich Ihrer Eigenschaften stark unterscheiden. Man differenziert grundsätzlich zwischen einer kopfbasierten und nicht kopfbasierten Anzeigeform. Bei kopfbasierten Displays (Head Mounted Displays, HMDs) gibt es optische und videobasierte HMDs, wobei bei ersteren die reale Welt direkt sichtbar ist und bei letzteren diese über die Videokamera eingelesen und angezeigt wird. Die nicht kopfbasierten Displays können Monitore, Smartphones oder Tablet-Computer sein. Für das im Folgenden beschriebene Konzept wurde eine prototypische Implementierung auf einem nicht kopfbasierten Display, einem Tablet-Computer, vorgenommen. Die Gründe für die Geräthewahl waren die Verfügbarkeit des Gerätes, die leichte Implementierungsmöglichkeit eines Prototyps und die Tatsache, dass das Gerät bereits für die Erweiterung des ViP-Composers verwendet wurde.

Um Informationen mit AR ortsbezogen anzeigen zu können, gibt es verschiedene Selektionsmechanismen. Die bekanntesten sind die Auswahl über die Geoposition und das

markerbasierte Tracking. Da die im vorherigen Kapitel beschriebenen Montagetätigkeiten oft in einer Halle oder in einer Schiffssektion ausgeführt werden, ist die GPS-Positionserkennung schwierig durchführbar. Aus diesem Grund wurde für den beschriebenen Prototypen das markerbasierte Tracking ausgewählt. Es wurde eine Datenbank aufgesetzt, die die Bilder der Marker enthält sowie einen eindeutigen Markerbezeichner. Diesem Bezeichner kann nun eine bestimmte Information hinterlegt werden. Ist beispielsweise als Information der eindeutige Teilebezeichner eines 3D-Modellteils zugeordnet, können nach Erkennen des Markers die Geometrie sowie die Metadaten selektiert und auf dem Tablet-Computer angezeigt werden. Dies funktioniert, indem der Marker erkannt wird und der Markerbezeichner durch eine Datenbankabfrage die hinterlegten Informationen zurückgibt. In dem vorgestellten Prototyp kann dies ein Modellteilbezeichner sein, wodurch die Tablet-Erweiterung des VIP-Composers die Geometrie und die Metadaten selektiert und anzeigt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Montageunterstützung mit Augmented Reality

Der Selektionsmechanismus nutzt dabei dieselbe Schnittstelle wie auch die mobile Applikation des ViP-Composers. Neben der Anzeige der Geometrie an der gewünschten Stelle im Raum können dadurch auch Metadaten wie Anschlussinformationen, benötigte Werkzeuge oder das Gewicht eingeblendet werden. Ausserdem kann der Werker schrittweise durch die Montage geführt werden, indem die Arbeitsfolge analog wie in Virtual Reality angezeigt wird. Der notwendige Steuerungsmechanismus ist im Prototypen implementiert und ermöglicht das Navigieren durch die Montageschritte sowie die Anzeige weiterer Montageinformationen. Eine komplette Montageanleitung kann zusätzlich als PDF-Dokument auf dem Tablet-Computer hinterlegt und verlinkt werden.

5 Fazit und Ausblick

Das hier vorgestellte Konzept zeigt einen ersten Ansatz zur durchgängigen Unterstützung von Montagetätigkeiten in der Unikatproduktion mit Virtual und Augmented Reality. Der erweiterte ViP-Composer unterstützt den Benutzer bei der Montageplanung mit Virtual Reality während des gesamten VR-Referenzprozesses und bietet durch die Kopplung der Modelldaten mit Metadaten automatisierte Modellaufbereitung sowie zusätzliche Informationsanzeige. Ein angepasstes

Interaktionskonzept nutzt einen Tablet-Computer für die immersive Steuerung des Composers und stellt damit ein intuitives Eingabegerät für VR-Anwender zur Verfügung. Für die Unterstützung der Montage vor Ort wurde mit diesem Gerät ein erster Augmented Reality-Prototyp entworfen, der die grundsätzlichen Möglichkeiten dieser Technologie aufzeigt. In einem nächsten Schritt sollen die bisher ausgewählte Hardware und der Trackingmechanismus evaluiert sowie die implementierten Funktionen kritisch überprüft und erweitert werden.

6 Literatur

- [Bohuszewicz 2007] BOHUSZEWICZ, O.: Der Weg zu bedarfsgerechten Virtual Reality-Lösungen, 6. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung; Paderborn, 2007
- [Milgram 1994] MILGRAM, P.; KISHINO, A. F.: Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, IEICE Transactions on Information and Systems, S 1321-1329, Toronto, 1994
- [Nedeß et al. 2005] NEDESS, C.; FRIEDEWALD, A.; KERSE, N.: Increasing Customer's Benefit using Virtual Reality (VR)-Technologies in the Design of Ship Outfitting, 4th Conf. on Computing and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT), S.113-122, Hamburg, 2005
- [Nedeß et al. 2008] NEDESS, C.; FRIEDEWALD, A.; SCHÄFER, C.: Veränderung von Engineering-Prozessen durch Virtual Reality – dargestellt am Beispiel des deutschen Schiffbaus, Scholz-Reiter, B. (Hrsg.): Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt, HAB-Forschungsbericht, GITO-Verlag, S. 137-153, Berlin, 2008
- [Nedeß et al. 2009a] NEDESS, C.; FRIEDEWALD, A.; SCHÄFER, C.; SCHLEUSENER S.: Deploying Virtual Reality (VR) Technology in Shipbuilding by using a Construction Kit for VR Applications Focused on the Business Process, 8th Conf. on Computing and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT), S.271-286, Budapest, 2009
- [Nedeß et al. 2009b] NEDESS, C.; FRIEDEWALD, A.; SCHÄFER, C.; SCHLEUSENER S.: Virtual Production Workflow Composer – ein Werkzeug zur Integration von Virtual Reality in betriebliche Prozesse, Go for Innovations Tagungsband (GO3D), S. 27-38, Rostock, 2009
- [Lödding et al. 2010b] LÖDDING, H.; FRIEDEWALD, A.; WAGNER, L.: Rule-based resource allocation – an approach to integrate different levels of planning detail in production simulation, 9th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '10), S. 203-212, Gubbio, 2010
- [Lödding et al. 2011] LÖDDING, H.; FRIEDEWALD, A.; HEINIG, M.; SCHLEUSENER, S.: Virtual Reality supported Assembly Planning in the Shipbuilding Industry in Bertram, V. (Hrsg.), 10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '11) Proceedings, S. 253-263, Berlin, 2011

Eine schnelle, direkte Methode zur Simulation von Flutungs- und Sinkvorgängen von Schiffen

Dipl.-Ing. (FH) Hendrik Dankowski, M.Sc.*

Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit
Schwarzenbergstraße 95C, 21075 Hamburg, Germany

*e-mail: dankowski@tu-harburg.de

1 Einleitung

Zahlreiche Seeunfälle der Vergangenheit bedingt durch die Flutung der inneren Unterteilung von Schiffen zeigen einen hohen Bedarf auf, diese Flutungsvorgänge mit Hilfe von numerischen Simulationen besser verstehen zu können. Häufig sind diese Unfallvorgänge aufgrund der hohen Komplexität der inneren Unterteilung nur schwer nachvollziehbar. Zu diesem Zweck wird ein numerisches Simulationsmodell entwickelt, welches in der Lage ist, schnell und direkt diese Vorgänge nachvollziehen und auch vorhersagen zu können. Durch die direkte Integration der Simulationsmethode in das schiffbauliche Entwurfssystem E4 der TUHH ist eine konsistente Datenmodellierung gewährleistet sowie eine Kopplung mit bestehenden Methoden möglich. Eine Validierung der Methode erfolgt anhand von Modellversuchen und Unfalluntersuchungen.

Es wird eine quasi-statische Methode entwickelt, welche im Zeitbereich die Flutung des Schiffes und dessen resultierende Schwimmlagen ermitteln kann. Die Strömungen über die vorhandenen Öffnungen der teilweise komplexen Unterteilung eines Schiffes werden mit Hilfe der inkompressiblen Bernoulli-Gleichung idealisiert. Teilgetauchte, große Öffnungen sollen ebenso berücksichtigt werden wie Öffnungen, die erst bei einem bestimmten Druck geöffnet werden, zum Beispiel Fenster. Nach Bestimmung der neuen Verteilung des Wassers im Inneren und die Ermittlung der Füllstände in den einzelnen Räumen, wird die daraus resultierende neue, quasi-statische Schwimmlage hydrostatisch bestimmt. Die Simulation wird fortgeführt bis entweder eine stabile Schwimmlage erreicht ist oder das Schiff sinkt und schließlich auf dem Meeresboden seine neue stabile Lage findet. Erweiterungen dieser Methodik wie Berücksichtigung dynamische Einflüsse der Schiffsbewegung durch Seegang sind denkbar. Dabei wird Wert darauf gelegt, die entscheidenden Effekte hinreichend genau abzubilden, ohne die Komplexität und damit die Geschwindigkeit des Simulationsmodells unnötig zu erhöhen. Es soll möglich sein für den Anwender, schnell verschiedene Variante untersuchen zu können, um zum Beispiel den Einfluss einer eventuell geöffneten wasserdichten Tür auf einen Unfallhergang nachvollziehen zu können.

Anwendungen dieser Simulationsmethode finden sich in der Unfalluntersuchung bereits verunglückter Schiffe, um durch Nachvollziehen des Unfallherganges Maßnahmen für neue Entwürfe ergreifen zu können, diese Unfälle in Zukunft zu vermeiden. Durch Kopplung mit der Leckstabilitätsberechnung können die zu untersuchenden Leckfälle und insbesondere Zwischenflutungszustände besser beurteilt werden. Des Weiteren ist denkbar, neue Kennwerte wie zum Beispiel die mittlere Zeit bis zum Sinken bzw. des Verlustes des Schiffes über alle Leckfälle zu ermitteln. Auch die Kopplung mit Evakuierungssimulationen ist in diesem Zusammenhang in Betracht zu ziehen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel der Einsatz an Bord von Schiffen zur direkten Beurteilung von Schadensfällen durch die Crew wären denkbar.

1.1 Zu modellierende Fälle

Als Vorüberlegung soll im Folgenden kurz darauf eingegangen werden, welche Anforderungen an das zu erstellende Simulationsmodell gestellt werden. Zunächst soll die Flutung der inneren Unterteilung eines Schiffes möglichst gut approximiert werden. Dabei gilt es verschiedene Arten von Öffnungen (kleine und große) und deren Zustände (frei oder getaucht) sowie Druckverluste über die Öffnungen zu

modellieren bei korrekter Bilanz der Flüsse. Des Weiteren sollen Effekte wie Kompression von eingeschlossener Luft, Flutung von bereits voll gefüllten Tanks sowie die aus Ladefällen bereits am Anfang gefüllten Tanks korrekt wiedergegeben werden. Die erforderlichen hydrostatischen Berechnungen bestehen aus der Schwimmlagenbestimmung während der quasistatischen Simulation im Zeitbereich sowie der Füllhöhen der Tanks für ein gegebenes Flutungsvolumen.

1.2 Grundgleichungen

Die Flutung von inneren Räumen soll mit dem im Folgenden genauer erläuterten Modell beschrieben werden. Die allgemeine, stationäre Bernoulli-Gleichung in Höhenform für einen Stromfaden von Punkt a nach Punkt b lautet

$$\frac{p_a - p_b}{\rho g} + \frac{u_a^2 - u_b^2}{2g} + z_a - z_b - \frac{\varphi_{ab}}{g} = 0 \quad (1.1)$$

Die Wasserströmung wird als inkompressibel, stationär sowie reibungs- und rotationsfrei angenommen. Verluste werden mit Hilfe des dissipativen Terms φ_{ab} modelliert und vereinfacht proportional zur Durchflussgeschwindigkeit angenommen. Zur besseren Übersicht wird dieser zunächst weggelassen und später durch einen empirischen Druckverlustbeiwert berücksichtigt. Im Folgenden sind die Drücke p_i immer bezogen auf den Umgebungsdruck p_u , da nur Druckdifferenzen betrachtet werden. Dies ist zu berücksichtigen, wenn eine Kompression der eingeschlossenen Luft betrachtet wird, da für Kompressionseffekte immer der Absolutdruck zu beachten ist.

$$p'_i = p_u + p_i \quad (1.2)$$

$$p'_a - p'_b = p_u + p_a - (p_u + p_b) = p_a - p_b \quad (1.3)$$

Der Volumenstrom (Fluss) ist gerade die Integrations der Geschwindigkeit u über die Querschnittsfläche A der Öffnung. Des Weiteren wird angenommen, dass die Strömung immer senkrecht zur Öffnung steht.

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial t} = Q = \int_A \mathbf{u} \cdot d\mathbf{A} = \int_A \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dA = \int_A u dA \quad \text{mit} \quad u = |\mathbf{u}| = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}. \quad (1.4)$$

2 Bestimmung der Flüsse

Im Folgenden wird erläutert wie die Geschwindigkeiten und die Flüsse durch die Öffnungen bestimmt werden. Eine Öffnung verbindet zwei Tanks miteinander, wobei die Umwelt ebenfalls als Tank idealisiert wird mit einer Spiegelgeschwindigkeit von Null bei Umgebungsdruck. Dabei wird unterschieden zwischen kleinen Öffnungen, für die vereinfachte Beziehungen gelten, und großen Öffnungen, bei denen der Fluss abschnittsweise integriert werden muss.

2.1 Kleine Öffnungen

Zunächst wird das einfache Modell von zwei über eine kleine Öffnung miteinander verbundenen Tanks betrachtet. Unter kleinen Öffnungen werden solche verstanden, deren Ausdehnung so gering ist, dass der Fluss über diese Öffnung als konstant angenommen werden kann. Dabei werden drei Fälle unterschieden für die ein allgemeingültiges Modell formuliert wird. Die Öffnung ist

1. einseitig getaucht (freier Fluss),
2. beidseitig getaucht (getauchter Fluss),
3. oder nicht getaucht (kein Fluss).

Der Fluss durch eine Öffnung ist bedingt durch die Gesamt-Druckdifferenzen der Tanks bezogen auf die Lage der Öffnung. Diese Differenz setzt sich zusammen aus den Umgebungs- bzw. Tankdrücken, den Drücken der Wassersäulen und den dynamischen Drücken bedingt durch die Spiegelgeschwindigkeiten.

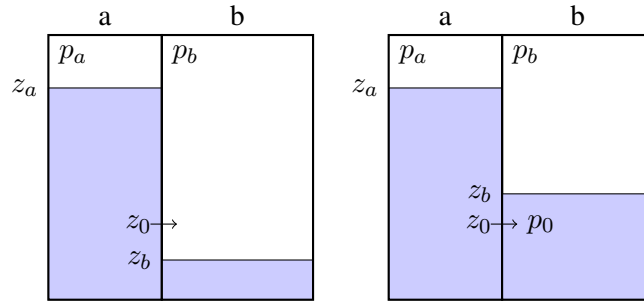


Abbildung 1: Kleine Öffnungen

2.1.1 Allgemeine Formulierung

Einseitig: Ist die Öffnung nur von einer Seite getaucht (Abbildung 1 links), so gilt folgende Beziehung für die Druckdifferenz

$$h_a = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{u_a^2}{2g} + z_a - z_0 \quad h_b = \frac{p_b}{\rho g} \quad (2.1)$$

$$h_a - h_b = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{u_a^2}{2g} + z_a - z_0 - \frac{p_b}{\rho g} \quad (2.2)$$

$$u_0 = \sqrt{2g \cdot (h_a - h_b)}. \quad (2.3)$$

Unter Vernachlässigung der Pegelgeschwindigkeit u_a und der Annahme gleicher Umgebungsdrücke $p_a = p_b$, ergibt sich die bekannte Ausflussformel von Torricelli für die Ausflussgeschwindigkeit (Bohl (1991))

$$u_0 = \sqrt{2g \cdot (z_a - z_0)} = \sqrt{2g \cdot h}. \quad (2.4)$$

Beidseitig: Wenn auf beiden Seiten Wasser vorhanden ist (Abbildung 1 rechts), ist die Geschwindigkeit unabhängig von der Lage der Öffnung:

$$h_a = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{u_a^2}{2g} + z_a - z_0 \quad h_b = \frac{p_b}{\rho g} + \frac{u_b^2}{2g} + z_b - z_0 \quad (2.5)$$

$$h_a - h_b = \frac{p_a - p_b}{\rho g} + \frac{u_a^2 - u_b^2}{2g} + z_a - z_b \quad (2.6)$$

$$u_0 = \sqrt{2g \cdot (h_a - h_b)} \quad (2.7)$$

2.2 Große Öffnungen

2.2.1 Modellierung

Bislang wurde angenommen, dass die Öffnungen klein sind. Bei größeren Öffnungen verändert sich der Querschnitt der Öffnungen und der Fluss ist nicht mehr konstant über die Höhe.

Eine große Öffnung wird beschrieben durch ebene Polygone, die beliebig im Raum liegen können. Dieses Polygon wird wiederum in z-Streifen in der Höhe diskretisiert. Für einen Streifen wird im Folgenden eine analytische Lösung des Flussintegrals präsentiert. Der Gesamtfluss über die Öffnung ergibt sich dann durch Summieren der Flüsse über allen Teilstreifen.

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, müssen wiederum verschiedene Fälle für die Wasserspiegel links und rechts der Öffnung unterschieden werden. Für die Physik der Strömung sind allerdings nur zwei Fälle zu unterscheiden

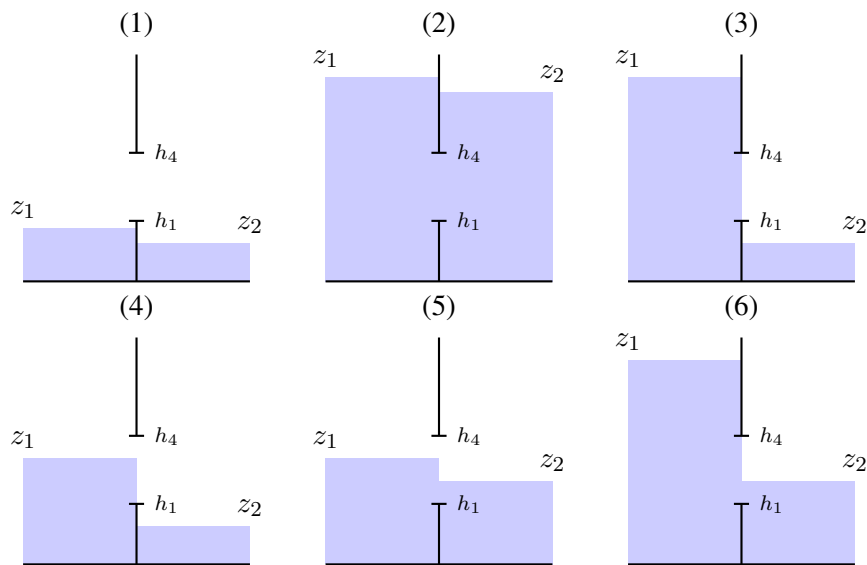


Abbildung 2: Große Öffnungen

- freier Ausfluss,
- tiefgetaucht.

Alle anderen Fälle ergeben sich indem die verschiedenen Bereiche der Öffnungen unterschieden werden. Beispielsweise ist für den Fall 5 aus Abbildung 2 der Bereich zwischen z_a und z_b ein freier Ausfluss, der Bereich von z_b bis z_0 tiefgetaucht.

2.2.2 Flussintegration

Die Formulierung für den Volumenstrom durch eine Öffnung ergibt sich nach Gleichung 1.4 zu

$$Q = \int_A u \, dA = \int_t \int_y u(t) \, dy \, dt = \int_t u(t) \cdot y(t) \, dt. \quad (2.8)$$

Um dies später auf beliebige Öffnungen erweitern zu können, die durch ebene Polygone definiert werden, wird zunächst nur ein z -Streifen betrachtet (siehe Abbildung 3). Da der Streifen beliebig im Raum orientiert sein kann, fallen die Integrationsrichtung t (über die Fläche) und die erdfeste z -Koordinate nur bei senkrechten Öffnungen zusammen. Daher werden diese unterschieden

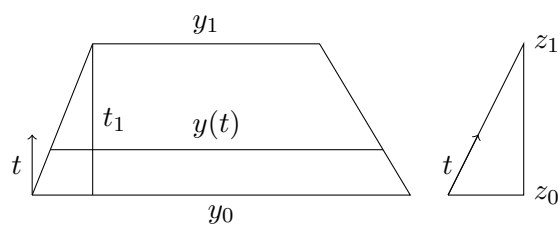


Abbildung 3: Streifen in z -Richtung

$$z(t) = z_0 + s \cdot t \quad \text{mit} \quad s = \frac{z_1 - z_0}{t_1} \quad \text{und} \quad t = [0, t_1] \quad (2.9)$$

$$t(z) = \frac{z - z_0}{s} = \frac{z - z_0}{z_1 - z_0} \cdot t_1. \quad (2.10)$$

Die Funktion der Breite eines Streifens ist gegeben durch

$$y(t) = y_0 + t \cdot \frac{y_1 - y_0}{t_1}. \quad (2.11)$$

Der Verlauf der Geschwindigkeit ist für den jeweils betrachteten Fall zu ermitteln.

2.2.3 Freier Ausfluss

Ist nur Seite A getaucht, so ergibt sich folgender Verlauf für die Durchflussgeschwindigkeit

$$h_a - h_b = z_a - z + \alpha \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_b}{\rho g} + \frac{u_a^2}{2g} \quad (2.12)$$

$$u(t) = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{z_a - z_0 - s \cdot t + \alpha}, \quad (2.13)$$

wobei der Faktor α alle von z unabhängigen Terme zusammen fasst. Es bietet sich an die Integration des Flusses zu unterteilen, um konstante Teile getrennt zu betrachten. Es ergibt sich als unbestimmtes Integral

$$h(t) = z_a - z_0 - s \cdot t + \alpha \quad (2.14)$$

$$q(t) = Q = y_0 \cdot \int_t u(t) dt + \frac{y_1 - y_0}{t_1} \cdot \int_t t \cdot u(t) dt \quad (2.15)$$

$$q(t) = -\frac{2}{3s} \cdot \sqrt{2g} \cdot h(t)^{\frac{3}{2}} \cdot \left[y_0 + \frac{y_1 - y_0}{t_1} \cdot \frac{1}{5s} \cdot (2h(t) + 5st) \right]. \quad (2.16)$$

Das bestimmte Integral ergibt den Gesamtfluss über den betrachteten Streifen

$$h(t_1) = h_1 = z_a - z_1 + \alpha \quad h(0) = h_0 = z_a - z_0 + \alpha \quad (2.17)$$

$$Q = q_1 - q_0 = -\frac{2}{3s} \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[y_1 \cdot h_1^{\frac{3}{2}} - y_0 \cdot h_0^{\frac{3}{2}} + \frac{2(y_1 - y_0)}{5(z_1 - z_0)} \cdot (h_1^{\frac{5}{2}} - h_0^{\frac{5}{2}}) \right]. \quad (2.18)$$

Somit können auch komplizierte Öffnungsquerschnitte hinreichend genau behandelt werden, da jedes ebene Polygon zur Beschreibung eines beliebigen Querschnittes in die beschriebenen z -Streifen unterteilt werden kann.

2.2.4 Sonderfälle

Bei Öffnungen die keine vertikale Ausdehnung haben, wie zum Beispiel horizontale Mannlöcher in aufrechter Schwimmlage, besteht das Problem, dass das Flussintegral singular wird mit $s = 0$. Allerdings vereinfacht sich das Flussintegral auch wie folgt

$$u(t) = u_0 = \sqrt{2g} \cdot \sqrt{z_a - z_0 + \alpha_1} \quad (2.19)$$

$$Q = \int_t u(t) \cdot y(t) dt = u_0 \cdot \int_t y(t) dt = u_0 \cdot A_0 \quad (2.20)$$

Der Fluss ist damit nur von der Höhe der Wassersäule über der Öffnung und dessen Fläche A_0 abhängig. Damit entspricht dies wieder einem freien Ausfluss durch eine kleine Öffnung.

Sind beide Seiten getaucht ist die Geschwindigkeit und damit der Fluss unabhängig von der Lage der Öffnung und es gilt wieder die gleiche Beziehung wie für tiefgetauchte kleine Öffnungen

2.2.5 Einfache Rechtecke

Zur Validierung wird der Fluss durch ein rechteckiges Stauwehr betrachtet. Die aus der Literatur bekannte Beziehung (Schröder und Zanke (2003)) lautet

$$Q = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}}. \quad (2.21)$$

Die gleiche Beziehung erhält man mit $\alpha_1 = 0$, $s = 1$, $z_0 = 0$, $z_a = z_1$ und $h = z_a - z_0$, sowie einer konstanten Breite $B = y_0 = y_1$ eingesetzt in Gleichung 2.18

$$Q = -\frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot (0 - B \cdot h_0^{\frac{3}{2}} + 0) = \frac{2}{3} B \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}}. \quad (2.22)$$

3 Flutungsvorgang

Zur eigentlichen Berechnung der Verteilung des Wassers im Inneren des Schiffes sind noch weitere Punkte zu beachten, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

3.1 Modellierung der Flutungswege

Die Verbindungen der einzelnen Räume untereinander über Öffnungen lassen sich sehr gut mit Hilfe von Graphen modellieren. Ein Beispiel hierfür ist zu finden in Abbildung 4.

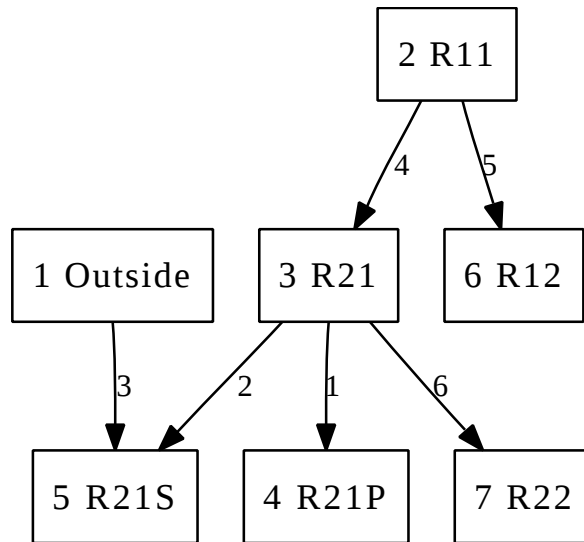


Abbildung 4: Graph eines einfachen Raummodells

3.2 Massenbilanz der Tanks

Die Flüsse durch die Öffnungen sind bekannt. Es verbleibt die Massenbilanz für jeden Tank korrekt zu ermitteln. Es wird der mittlere Tank B aus dem einfachen Beispiel aus Abbildung 5 betrachtet. Aus der Massenerhaltung folgt sofort, dass der Wasserstand im Tank sich genau um die Bilanz der Flüsse durch die Öffnungen des Tanks ändert. Die Richtung der Flüsse ist bereits in der vorzeichenbehafteten Geschwindigkeit implizit enthalten. Wenn bekannt ist welche Öffnungen zu welchen Räumen gehören, ergibt sich der Volumenstrom für den Tank B zum Beispiel wie folgt

$$Q_b = Q_{ab} - Q_{bc}. \quad (3.1)$$

Wie bereits erwähnt, wird für den Zeitschritt dt der Fluss als konstant angenommen. Daraus folgt das neue Füllvolumen des Tanks

$$Q_b = \frac{V_b^{(1)} - V_b^{(0)}}{dt} \quad (3.2)$$

$$V_b^{(1)} = V_b^{(0)} + Q_b \cdot dt \quad (3.3)$$

$$V_b^{(1)} = f(z_b^{(1)}) \rightarrow z_b^{(1)}. \quad (3.4)$$

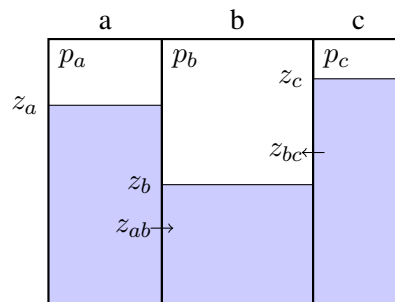


Abbildung 5: Bilanz für drei Tanks

Der erforderliche neue Füllstand $z_b^{(1)}$ muss iterativ gefunden werden. Die neue Pegelgeschwindigkeit wird analog bestimmt

$$u_b^{(1)} = \dot{z}_b = \frac{z_b^{(1)} - z_b^{(0)}}{dt}. \quad (3.5)$$

3.3 Behandlung von Luft

Ist ein Tank oder Raum nicht entlüftet, was in der Praxis kaum vorkommt, so ist eine Kompression der eingeschlossenen Luft zu beachten. Nach dem Gesetz von Boyle-Mariott ist der Druck umgekehrt proportional zum Volumen

$$p'_0 \cdot V_0 = p'_1 \cdot V_1. \quad (3.6)$$

In diesem Fall ist der atmosphärischer Umgebungsdruck zu beachten:

$$(p_u + p_0) \cdot V_0 = (p_u + p_1) \cdot V_1 \quad (3.7)$$

$$p_1 = p_u \cdot \left(\frac{V_0}{V_1} - 1 \right) + p_0 \cdot \frac{V_0}{V_1} \quad (3.8)$$

$$p_1 = p_u \cdot (\alpha - 1) + p_0 \cdot \alpha \quad (3.9)$$

Das Volumen in einem Tank V_t setzt sich zusammen aus Luft V und Wasser V_w , wobei nur die Luft als kompressibel angenommen wird.

$$V = V_t - V_w \quad (3.10)$$

$$\alpha = \frac{V_0}{V_1} = \frac{V_t - V_{w0}}{V_t - V_{w1}} \quad (3.11)$$

Eine Umverteilung der eingeschlossenen Luft im Schiff wird nicht modelliert.

3.4 Komplett geflutete Tanks

Sind ein oder mehrere beteiligte Tanks bereits voll gefüllt (oder die Luft maximal komprimiert), so ist dieser Fall besonders zu betrachten. Hierbei entsteht eine Kopplung zwischen den beteiligten Tanks und es ergeben sich folgende Randbedingungen für das Modell: Die Pegelgeschwindigkeiten der vollen Tanks werden Null ebenso der Gesamtfluss dieser Tanks, d.h. die Massenerhaltung muss gewährleistet sein. Die Geschwindigkeiten durch den Öffnungen können nicht Null werden, da Volumenströme vorhanden sind. Mit Hilfe dieser Bedingungen und den Druckdifferenzen über den Öffnungen kann ein (nichtlineares) Gleichungssystem aufgestellt werden. Zur Illustration wird beispielhaft die Situation aus Abbildung 6 betrachtet, die mittleren Tanks B und C seien voll gefüllt.

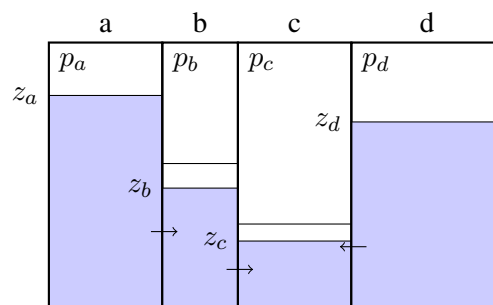


Abbildung 6: Flutung der bereits vollen Tanks B und C

Die beiden Drücke in den Tanks B und C sind iterativ zu bestimmen. Dabei ergeben sich drei Gleichungen für die Geschwindigkeiten durch die Öffnungen, sowie zwei weitere aus der Volumenbilanz der vollen Tanks. Tatsächlich sind aber die Flüsse indirekt von den Geschwindigkeiten abhängig, somit ergeben sich hier zwei nichtlineare Gleichungen mit zwei Unbekannten. Wie sich in der Praxis gezeigt hat, lässt sich dieses Gleichungssystem mit nur wenigen Iterationen gut mit einem geeigneten Verfahren numerisch lösen. Dies ist erforderlich für alle vollen Tanks im System, wobei zusammenhängende, volle Tanks in einem Gleichungssystem zu behandeln sind.

3.5 Simulationsschritt

Ein Zeitschritt der Simulation sieht damit wie folgt aus:

1. Schwimmlage bestimmen
2. Flüsse der Öffnungen ermitteln
3. Massenbilanz der Leckräume und Ermittlung der neuen Pegelständen
4. Konvergenz prüfen
5. Neue Tankdrücke unter Berücksichtigung von Luftkompression

Da die Bestimmung der Schwimmlage im Vergleich relativ aufwändig ist, reicht es meist diese nur jeden n-ten Zeitschritt neu zu bestimmen. Als Konvergenzkriterium für den Abbruch der Gesamtsimulation wird die Veränderung des Gesamtflusses durch die Öffnungen verwendet, d.h. das Flutungswasser hat sich hinreichend im Schiff verteilt und es erfolgt kaum noch Austausch von Wasser zwischen den inneren Räumen.

4 Validierung

Zur Validierung der entwickelten Methode ist geplant die in Tabelle 1 aufgeführten Fälle zu verwenden. Nachfolgend werden erste Ergebnisse der Validierung mit der Testbarge gezeigt.

Tabelle 1: Validierungsfälle

Schiffsname	Zeitpunkt
TEST BARGE	2006
HERAKLION	8. Dezember 1966
EUROPEAN GATEWAY	19. Dezember 1982
EXPRESS SAMINA	26. September 2000
SEA DIAMOND	5. April 2007
ESTONIA	28. September 1994

4.1 Modellversuch

Der Versuch wurde 2006 von P. Ruponen am Schiffbaulabor der Universität Helsinki durchgeführt und diente auch zur Validierung seines Flutungsmodells, voraus später seine Dissertation Ruponen (2007) hervorging. Weitere Details sind dort zu finden, hier sei exemplarisch der Testfall A verglichen, welcher eine Beschädigungsfall mit sechs Öffnungen darstellt (vgl. auch Abbildung 7).

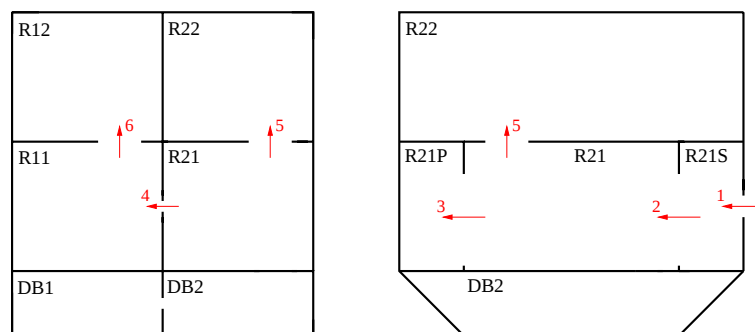


Abbildung 7: Öffnungen Ruponen (2007) Testfall A

Der Vergleich der ermittelten Werte für die Bewegung des Modells ist in Abbildung 8 dargestellt. Entscheidend für die korrekte Wiedergabe des Flutungsvorganges sind die Verläufe der Wasserstände in den einzelnen Räumen. Diese sind für vier Räume dargestellt in Abbildung 9. Für diesen ersten Testfall ist

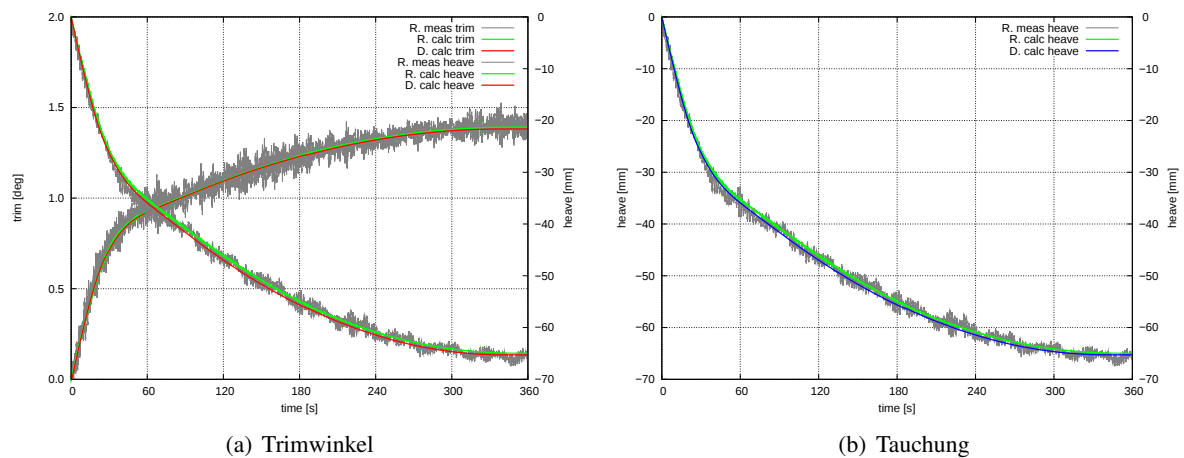


Abbildung 8: Vergleich der Schiffsbewegung

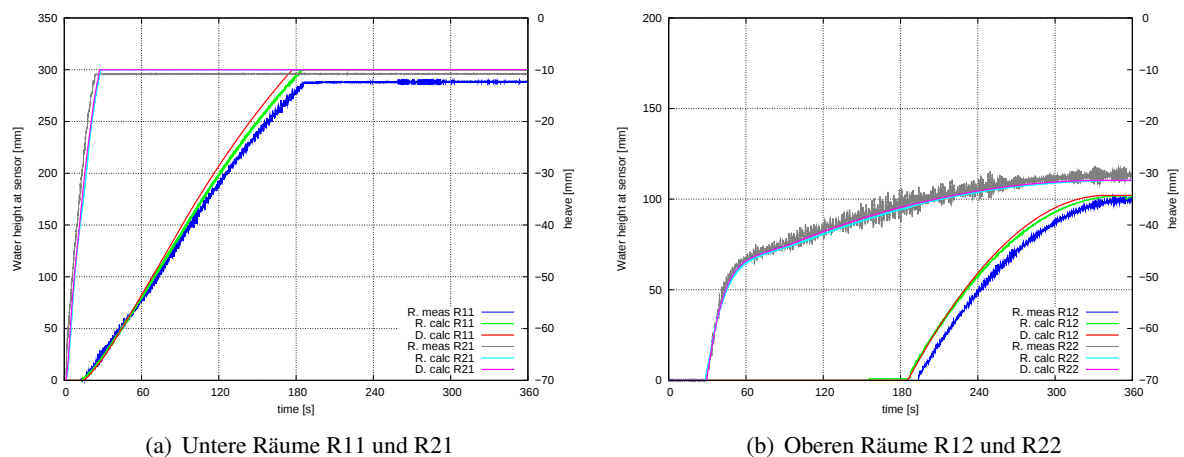


Abbildung 9: Vergleich der Pegel

ein sehr gute Übereinstimmung festzustellen, sowohl mit dem von Ruponen entwickelten Verfahren als auch mit den Messwerten. Dies ist auch darauf zurück zuführen, dass die Druckverlustbeiwerte sehr gut bekannt waren. Weitere Validierung anhand von echten Schiffsunglücken folgt.

5 Ausblick

Eine erste erfolgreiche Validierung hat gezeigt, dass dieses einfache, explizite und schnelle Verfahren die wesentlichen Effekte im Leckfall bei Glattwasserbedingungen korrekt wiedergibt. In Zukunft wird eine Erweiterung des Modells um dynamische Effekte angestrebt. Zur Zeit kann bereits eine regelmäßige Welle als Wasserkontur an den Öffnungen angenommen werden. Des Weiteren wäre es auch denkbar diese Methode anzuwenden bei der Evaluierung von Zwischenflutungszuständen in der Leckrechnung.

Neben der Berechnung der Flutungsvorgänge soll die Bewegung des Flutungswassers im Schiff mit Hilfe von Flachwassergleichungen (Söding (1982)) simuliert werden. Im Zusammenhang mit einer Simulation der Schiffsbewegung im Seegang durch bereits vorhandene Methoden, könnten damit sehr gut Aussagen über das Seeverhalten von Schiffen nach dem Leckschlagen unter Berücksichtigung aller wesentlicher Effekte gemacht werden.

6 Literatur

- [Bohl 1991] BOHL, Willi: Technische Strömungslehre. 9., überarb. A. Vogel Verlag Und Druck, 1991. – ISBN 380230036X
- [Ruponen 2007] RUPONEN, Pekka: Progressive Flooding of a Damaged Passenger Ship. Helsinki University of Technology, 2007. – URL <http://lib.tkk.fi/Diss/2007/isbn9789512290130/>. – ISBN 9789512290130
- [Schröder und Zanke 2003] SCHRÖDER, Ralph ; ZANKE, Ulrich C. E.: Technische Hydraulik: Kompendium für den Wasserbau. 2. A. Springer, Berlin, Mai 2003. – ISBN 3540000607
- [Söding 1982] SÖDING, Heinrich ; SCHIFFBAU, Institut für (Hrsg.): Leckstabilität im Seegang. 429. Hamburg : Institut für Schiffbau, 1982. – 71 S

Development of an on-board Trial Trip Analysis Tool

Lennart Pundt

Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Entwerfen von Schiffen und Schiffssicherheit
Schwarzenbergstr. 95C, 21073 Hamburg
Lennart.Pundt@tuhh.de

Abstract

The requirements of a software to record and evaluate the trial trip of a ship and to correct and analyse the data afterwards are described in this article. The outcome is an exact correlation between engine power and ship speed for contract conditions. The corrections concern environmental and ship condition in general. Besides to speed trials the same methods can be used to measure the performance of the ship. The environmental influence on fuel consumption could be estimated in this way and errors of the ships engine could be identified earlier.

1 Introduction

During the Trial Trip of a ship various manoeuvres have to be undertaken to prove that the ship full fills the contract on the one hand and certain international laws on the other hand. Usually the weather and ship condition during the trials do not comply with the design and contract conditions. Therefore certain corrections have to be made to be able to verify the ships performance. The result of speed trials is usually corrected for the environmental influence of wind, waves, current and rudder and drift angle. Also the ships condition of the propeller and hull and the displacement are taken into account. These factors have to be measured accurately and all sensors need to be connected to the software. Since infrastructure on board varies on greater scale the system needs to be flexible to adapt to different surroundings. Data needs to be recorded, observed and evaluated during the trials. A simple user interface has therefore been developed for the user to assist to overlook the measurement. Results of the manoeuvre are being calculated while under way to help judge the quality of the measurement. An integrated analysis tools is used after trials to compute the final outcome of the tests. Finally a reporting systems produces standard documentation for the yard, owner and classification society.

2 Factors influencing Ship Performance

The performance of a ship from the viewpoint of the owner is the cost for a travelled distance divided by the amount of cargo which is transported at a certain speed. If consumables, maintenance, crew and fixed cost are not included, the operational cost is direct proportional to the fuel consumption and energy output of the engine. This leads to the point of view for a naval architect where the performance of a ship is described by the correlation between ship speed through the water and delivered power to the propeller. This speed power curve is determined during model test for calm weather conditions. But it is found that the ship always needs more fuel or power than estimated by model tests. This is due to the fact, that the model test relates to best conditions concerning weather, ship and engine. At a certain speed the ship has a resistance force opposite to the direction of the movement. To move the ship a propulsion force in direction of the movement is needed. This force is generated by the propeller which is driven by the engine. All aspects concerning resistance and

propulsion of the ship have to be taken into account to be able to calculate the ships performance. In the following paragraph general parameters that have an influence on these parameters are described, as defined by the International Standardization Organization [ISO 15016].

2.1 Influence on Resistance

The resistance of the ship without external influence can be divided in three parts: frictional, wave and residual resistance. The two later ones are considered to be constant for a defined ship speed and therefore not taken into account for the further analysis. Only the frictional resistance is depending on weather conditions because the kinematic viscosity is a function of salinity and water temperature. Direct measurement of viscosity is difficult in ship operation. It has proven to be more practical to measure temperature and salinity or density. It is most simple to measure the conductivity of the water and calculate salinity, which leads to density and kinematic viscosity. This would be possible to do automatic and frequently but would require an outboard sensor, which is not common on most ships. Since physical properties of the water do not change drastically when in open water a single measurement for the noon report is sufficient for performance monitoring as well for a trial trip analysis.

2.1.1 Ship condition

The condition of the ship has several influences on the speed power correlation. A major factor are the trim and draft of the ship. To consider this accurately, model test on different drafts are essential, especially if the range of different drafts is high. A very simple approach can be found in the ISO 15016, which just scales the total resistance by the draft. Concerning trim only model test or direct simulations are found to be reliable and no simple formula can be given for trim corrections. Furthermore the condition of the hull surface regarding fouling has a major influence on the power demand. For new ships this can be neglected, but not for ships in service. So far, no reliable scientific approach can be found in literature [ISO 15016]. For hull roughness no simple measuring device is available. Draft measurement would be possible by pressure sensors located at the keel of the ship, but are not common. Usually a draft reading in harbour and comparison with the loading computer are used to determine the loading condition of the ship. For performance reasons one value per day from the noon report is sufficient. For a precise calculation for speed trials the consumption of fuel from the point of time of draft readings until trials needs to be accounted for.

2.1.2 Waves

A significant increase on ships resistance is produced by the irregular waves which are encountered. The additional resistance is proportional to the square of the wave height and produced by several different effects, [Zhou 1989]:

- Pressure fluctuations on the hull, mainly caused by medium and long crested waves
- Reflection of short crested waves on the hull
- Oscillating longitudinal motion (surge)
- Additional friction caused by orbital movements of the waves and surge
- Rudder and drift angles

Hull form, swell data, significant wave height, mean period and predominant direction of the waves are the main parameters to influence the added resistance by seaways and need therefore to be known for an accurate correction.

More simple approaches do not consider the shape of the ship, but only wave height and direction like the early approach of Kreitner [Kreitner 1939]. This is valid only for waves encountered from the bow with heights up to 2m. This is used by the ITTC for correcting speed trials, because it is very simple but with limited validity [ITTC 2005]. For more complex and accurate correction methods the shape of the waterline or of the complete hull need to be available as well as more data on the seaway.

For a full measurement of seaway data the significant wave height, period and direction of swell and wind sea are necessary. This is quite challenging to measure from the ships sight. X-band based radar-systems like WAMOS are able to do this but are installed vary rarely on board. It is a god and simple way to use Ultrasonic range sensors, which can detect the distance between the sensor and the water surface. If the movement of the ship is known by gyro measurements, wave height and period can be calculated. In general it is complex to get reliable data on the seaway from sensors on board. Therefore it is common to judge the wave parameters by sight from the bridge during trials. This is not satisfactory for speed trials. Hind cast data can also be used for performance monitoring, if available for the region where the ship is sailing. It can be said, that wave parameter data is one of the difficult to measure data for trial trip or performance analysis.

2.1.3 Rudder and Drift Angle

The influence of the rudder angle on ships resistance is rather small, compared to other influences as long as the angles are small [Zhou 1989]. To calculate the influence according to ISO 15016 the dimensions of the rudder, the angle and the inflow speed to it need to be known. The rudder angle is always measured with an angular or way transducer at the steering gear. On most ships the value of the rudder Sensor Angle is broadcasted via NMEA 0183 protocol and is direct available. If this is not the case, the rudder gauge at the bridge is controlled by an analogue voltage signal. For trial trips this could be connected to an analogue/digital converter and after calibrating the rudder signal is available for digital recording.

The added resistance for drifting is depending on draft, ship speed and drift angle. The drift cannot be measured directly with a satisfactory accuracy (due to boundary layer effects of the ship) even though logs are available that measure the water flow in longitudinal and transversal direction of the ship which leads to the drift angle. It is more precise to use the heading of the track from GPS and the true heading received from the compass. The accuracy of the compass is the significant value for a correct drift angle. GPS track is always available through NMEA, compass values might not be. If not the drift angle for trial trip analysis cannot be monitored and is more or less just available for a single point of time and not continuously.

2.1.4 Wind

The wind generates a drag force as well as a yawing moment. Both depends on the relative wind speed and direction of the wind compared to the ship and of course on the shape of the superstructures. This makes calculating the increase of resistance complex, because for most ships the lift and drag coefficients are not known. Good and simple results can be gained if coefficients are taken from similar ship types which can be found in literature like [Blendermann 1996]. Constant wind which does not come from bow or aft results not only in increased resistance but also in drift and rudder angles.

Since every ship is equipped with an anemometer, only availability of the values is an issue. Usually wind speed is broadcasted via NMEA data sentences and can be directly processed. Accuracy is doubtful though because the measuring instrument is somewhere on the ship at the mast and might be

shaded at some angles from radomes, antennas or other equipment. Wind measurements on two counter runs usually deviate in speed and angle. Differences of 30% and more are not unusual. This is more a problem for performance monitoring, because fairing from counter runs is not available and a measured value suggests accuracy which might or might not be given.

2.2 Influence on Propulsion

Not only the ships resistance is influenced by the environment but also the ships propulsion power but to a much lesser extent and with more constant condition. The Propulsion power is stored in fuel on board, transformed into rotational mechanical power in the engine, transmitted by the shaft line to the propeller which turns it into thrust. All Conversions of course go along with power losses which are expressed as efficiency coefficients. They must not be constant but can differ and therefore must be taken into account.

2.2.1 Fuel/Engine

If propulsion efficiency is measured by the amount of fuel needed for propulsion, the heating value of the fuel needs to be measured and taken into account. Also the engine efficiency needs to be known for that propulsion point. If the propulsion power is determined by a torque measurement on the propeller shaft directly, as it is recommended during trial trips, fuel quality and engine efficiency need not to be taken in account and measured values are more accurate. Even though these values are in general not available in real-time but have to be synchronized after trials. This requires precise timing of all measurements.

For performance monitoring, power measurement on the shaft is generally not available. Then the amount of fuel used is the easiest way to measure propulsion power but less accurate. With fuel consumption, heating value and energy efficiency the shaft power can be calculated. Usually none of the above mentioned factors are available by constant measurement, but have to be taken from noon-to-noon reports.

2.2.2 Propeller

The shaft power is transformed into thrust by the propeller. The propulsion efficiency between delivered power and thrust is depending on the open water efficiency of the propulsor and the hull efficiency which includes wake and thrust deduction fractions. These elements are sensible to the propulsion point of the ship. A change of ships resistance leads to a change of propulsion efficiency. This means that an additional resistance not only increases propulsion power by itself but maybe also by decreasing the efficiency of the propeller. To be able to account for this behaviour open water characteristics of the propeller and distribution of wake fraction and thrust deduction fraction must be known.

2.3 Influence on Speed

Besides the influence on resistance and propulsion environmental conditions can affect the ship speed directly. This is mainly caused by an overlaying current of the water

2.3.1 Current

Resistance and propulsion usually correspond to ship speed through water. If the water itself is moving in current, the ship performance is still the same referred to the water. Referred to the ground the speed changes. The speed of the ship is usually measured by GPS and therefore refers to speed over ground.

In this case current has to be included in the calculations. Speed through water could be measured with the ships log, but accuracy and calibration are not high enough for trial trip analysis. For performance monitoring, using the ships log for measuring current can be an option. Values are in general available as NMEA data stream.

2.3.2 Water Depth

Restricted water depth has also a direct influence on ship speed. If clearance below keel is becoming quite small, the flow around the ship is obstructed. This leads to an increase of speed through water which on the other hand increases the ship's resistance. Also the wave pattern of the ship changes in narrow waters, which also increases the resistance. Restricted water depth could be included in additional resistance but the most common correction for it by [Lackenby 1963] calculates the fraction between speed in restricted and open water conditions. Water depths is always measured on board of a ship and in general easily available by NMEA.

2.4 Required Data

Analysis and correction of trial trip results for environmental and ship condition as well as accurate performance monitoring as described in paragraph 2 require a large number of measured data. The biggest problems for accurate correction is availability and accuracy of this data.

2.4.1 General Data

For setting up a system to do the corrections general ship data needs to be available. This includes values like general dimensions of the ship or shape and size of rudders. These are independent on the loading condition. Other general information is on the other hand dependant on the trim and draft of the ship. For correcting a speed trial this causes not such a big problem since the loading condition for trials is more or less known throughout project phase and the information can be acquired. For Performance Monitoring this causes much more of a problem since loading condition varies on a large scale and some information are just not available and estimating leads to tremendous inaccuracies for some parts. Most affected by this is the speed/power correlation of the ship. But also propeller performance in open water condition, windage area and wind resistance coefficients vary, but on a much smaller scale.

2.4.2 Continuously measured Data

Data which is continuously available through NMEA is the most valuable source for corrections. Unfortunately this also varies on a great scale, but the following should be installed on a modern merchant ship: GPS information about position, speed over ground and track made good, true heading from gyro/compass, speed through water from ships log, relative wind velocity and angle, water depth below keel, rudder angle and propeller shaft speed as well as propeller pitch. Most of the values come with a high accuracy, but not all. For calculating drift angles the heading of the ship from compass and from track over ground need to be known and should be more accurate than 0.5degrees. At the trial trip of a ship this might be the case, since the compass is just calibrated. But it was found on several trial trips that still this is not the case. Using a separate Differential GPS with two coupled antenna solves the problem, because it is able to reliably calculate drifting angles more precise than 0.1 degrees. For performance monitoring that is not a practical solution and therefore calculating an accurate drift depends on compass calibration. Measuring speed through water and current with a ships log is also imprecise since the ships boundary layer of the water influences the measured values. Current can be estimated with fair accuracy on trials if the ship undergoes counter runs for the same

propulsion point. In normal operation this is of course not possible. Using the log with low precision is the only possibility. The Wind sensor of the ship is also affected by boundary effects and even worse might be shaded by antennas, radomes, mast or other superstructures at some wind angles or wind speeds. This leads to great inaccuracies at some angles, while others are correct. Since it is not known which value is correct this can cause significant errors. Calculating true winds and fairing it for several counter runs on trials reduces the error.

2.4.3 Other Data

For knowing the propulsion point information about propulsion power is crucial. Usually no accurate sensor is installed on board a ship to do this. That is why a power meter is used at trials to measure the torque and power of the propeller shaft. This system is in general just temporarily installed and is not connected to other ships systems. This leads on one hand to accurate power measurements but also requires accurate synchronization because values are taken after trials have finished and not live data connection is available from the engine room to the bridge. For Performance Monitoring Propulsion power is estimated by the fuel consumption. This is in most cases only available from noon-to-noon reports. This is not only inaccurate but also it is not known how the power was distributed over time. This is a large challenge for correcting speed/power correlation for ships in service.

Table I: Overview of availability and accuracy of required data for Trial Trip Analysis and Performance Monitoring

Data	Trial Trip		Performance Monitoring	
	Availability	Accuracy	Availability	Accuracy
Speed/Power Curves	Trial and Design draft from model test	high	Trim/Draft not available	-
Propeller open water performance	Model test	high	Model test	high
Wind resistance coefficients	Literature/ Model test	Fair/high	Literature/ Model test	Fair/high
Air Temperature	Measurement at harbour	high	Noon-to-noon report	high
Water Density	Measurement at harbour	high	poor/hind cast	fair
Water Temperature	Measurement at harbour	high	poor/hind cast	fair
Condition of Hulls	clean	high	Poor	low
Draft	Read at harbour	high	Noon-to-noon report	low
Seaway	Estimate by crew	poor	Noon-to-noon report	poor
Rudder Angle	Sensor/NMEA	high	Sensor/NMEA	high
Drift Angle	Compass/NMEA	fair	Compass/NMEA	fair
Wind Velocity/Angle	Sensor/NMEA fairing after counter run	fair	Sensor/NMEA	low
Shaft Power	Direct measurement/ time not synchronized	high/fair	none	
Fuel Consumption	Not necessary	-	Noon-to-noon report	low
Fuel Heating Value	Not necessary	-	Estimate/fuel bill	low
Propeller Pitch	Sensor/NMEA	fair	Sensor/NMEA	high
Water Current	Counter Run	fair	Log	low
Water Depth	Sensor/NMEA	high	Sensor/NMEA	high

Some environmental conditions are not continuously measured on a standard ship but have an influence on ships resistance. Most of them can be acquired by simple readings and are part of a regular noon-to-noon report anyway. This includes air and water temperature, trim and draft and seaway condition. Latter one is problematic since it has a very high influence on ships resistance and it is usually judged from the bridge by an individual. Significant wave height and direction are almost impossible to acquire under such circumstances. An overview of the most important values can be found in Table I.

3 Architecture of Software

The Software is part of an existing Software package and therefore has to yield to programming standards of that package. The language used is *FORTRAN 95/2003* and for some parts *C* while being compiled in a *LINUX* environment. This leads to some inconveniences and restrictions concerning graphical performance. For a comfortable recording and correction of a trial trip the program has to fulfil different requirement. The following list sums up basic demands which have been identified during several trials:

- very flexible hardware connection to the ship
- robust data handling
- secure real time recording of data
- integrity check of data
- real time analysis and manoeuvre evaluation
- data visualization
- user input and interaction
- use of recognized and transparent correction methods
- quick report function

To meet this profile of requirements the structure shown in Figure 1 has been developed, which consists of four different threads. The first one is the main program which calls the threads and coordinates communication between different parts of the program. The second thread receives the data from the ship's automation, while the third one undertakes general data handling and evaluation. Thread number four is for displaying information. In the following sections the tasks of the different parts are described in detail.

3.1 Main Program

The Main Control loop manages the general activity of the program. It sets up the menu structure, common data handling and starts and ends other threads.

After starting the program a menu structure is set up, which is diagrammatically shown in Figure 2. The Structure supports a step by step process for trial trip analysis. Prior to sea trials general ship data should be entered into the database. This information is supposed to be well known and includes general project information, main dimension and stipulated contract condition. Also model test results are required and include Resistance curves, if available for different draught and trim conditions, Hull efficiency elements, propeller open water diagram and a prognosticated speed/power curve.

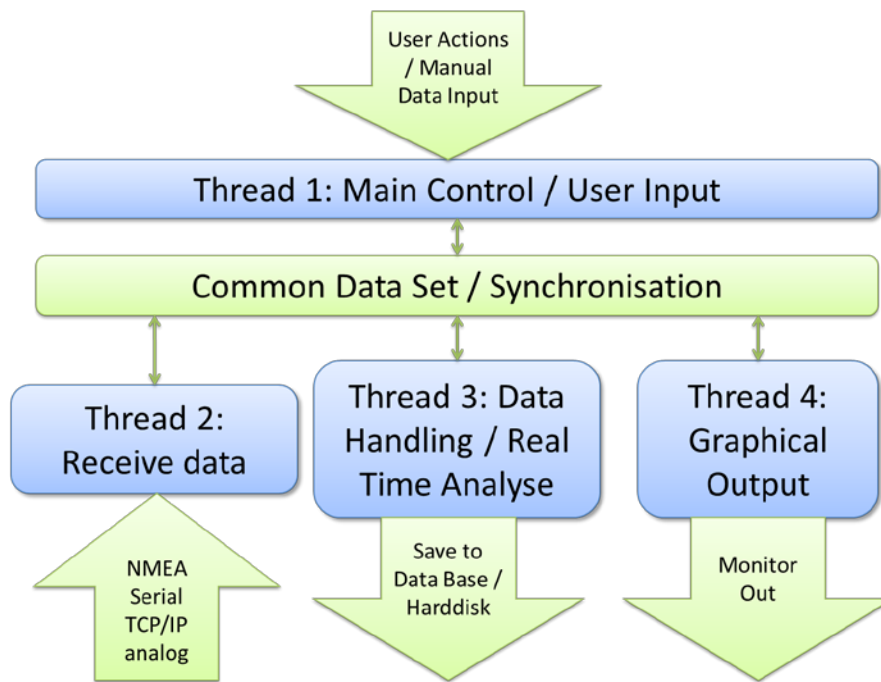


Figure 1: Architecture and data flow of the software for data recording and live analysis

Once the ship is readily equipped for the trials the measurement system need to be connected to the NMEA data stream ether via serial connection or network protocol like TCP/IP or UDP. As described in chapter 2 it might be necessary to connect to analogue signals or even install own sensors. These have to be configured in the software and different data channels have to be configured and assigned to the corresponding data fields. This is done in the Connections Settings of the software. This configuration has to be very flexible, because it has been found that often even the NMEA sentences do not fully comply with the standard. Some a sentence contained more information than specified sometimes less. Or data fields were used to transmit data, for which they were not specified for. It is therefore absolutely necessary to be able to manually configure the format of the sentences. The prefix of a sentence has to be clearly signed to the corresponding data. For example if a ship is equipped with two independent GPS receivers for redundancy and the antennas are positioned on different locations the must be clearly identifiable otherwise the ship's position would "jump" on every other received sentence. If the format does not comply with NMEA 0183 then it is more difficult to prepare in advance. User definable data fields in front and behind each sentence have worked so far with all occurred standard and nonstandard formats.

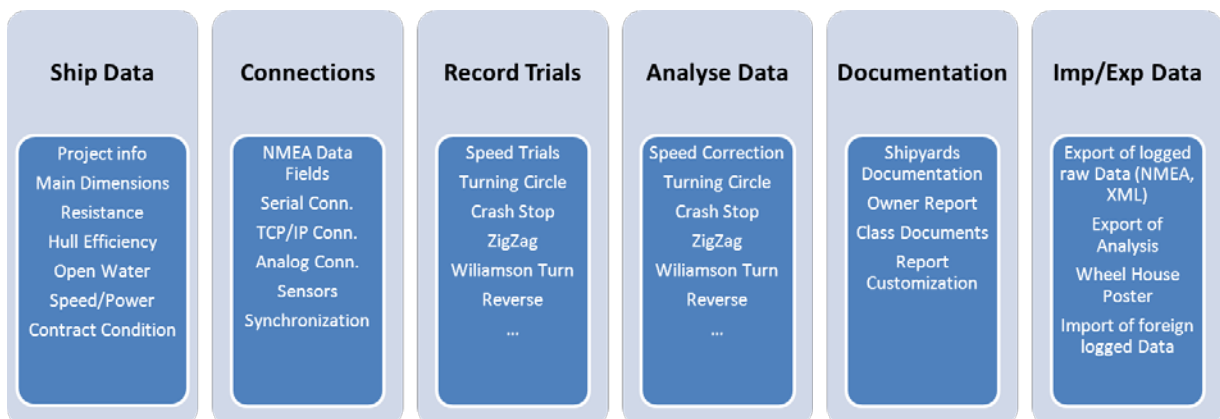


Figure 2: Diagrammatic Structure of Menus

With the later step preparations are concluded to start the actual trial measurements. To keep the graphical display clear arranged and with only data visible which is actually of interest, the record module is divided in separated parts for each manoeuvre. If one of the recording methods is called the main program initiates 3 threads. One to handle the data input, one to manage and evaluate the data and one for the graphical display. These threads are described further below. Also a common data module is assigned and the main program handles read and write requests from all threads. Not every action during a manoeuvre can be automatically detected by the software. Therefore user input is necessary. This could be simple text comments which are linked to a specific point of time or position. This can also be inevitable information like the begin of a pre run or the moment when throttle is set to zero during coasting stop trials. This input is also handle by the main program.

After trials are finished the recorded data needs to be analysed and corrected. This is done by the fourth menu item. The recorded data can be edited to some extent in this function. If information like water temperature, wave data or propulsion power are only available after trials, it can be added at this point. The actual correction of the speed trial is undertaken in this module. One can chose from different correction methods like the ones mentioned in paragraph 2. All results which are requested by [DIN 19019], [ISO 15016] and [DIN 81208] are calculated in this method.

The reporting of the trials is done in the next part. First of all the shipyards own documentation with all recorded data, additional comments and information. The official report can be customized to some extent and adopted to ship yards standards. The information required by the corresponding norm as well as measured and analysed values can of course not be edited and are the main part of the report for owner or classification society.

For custom usage of recorded data and transparency it is necessary to be able to export the recorded and analysed data. This is done in the data import and export part. The import function is used to load older NMEA data files and to analyse and correct them with this software.

3.2 Data Receiver

This thread is set up to continuously receive data on various connections. The required information as stated in paragraph 2 is sent through various channels. This might be just one serial connection to a NMEA 0183 port or a wireless transmission via UDP. It might also be different serial connections if not all information is coming from the bridge but from extra installed equipment. If for example a DGPS with Doppler-antennas is used to measure the heading it would be connected to a different port. The receiving module is then used to multiplex the data. Analogue sensors like rudder angles can be connected through an A/D transducer, Gyro or ultra-sonic wave sensors might as well be connected. All incoming data is handled by this structure.

For processing the data a primary data field needs to be specified in the settings menu. As default this is a GPS position which is for example transmitted by a *\$GPGGA* or *\$GPRMC* sentence. If this is received one dataset ends and all data received afterwards is linked to the next position. As soon as the position is received, the thread locks a mutex, writes the raw data in a common variable and frees the mutex again. Now the process signals through another mutex to the main loop that new data is available. Recording of a new dataset begins. For this structure the programming language *C* is used, since it is much easier to include serial connections, TCP/IP and UDP protocols or external sensors than in *fortran*. Communication with the other threads is done by the intrinsic module *ISO_C_BINDING* available since *fortran 2003*. A user defined data type is initialised in *C* and then passed as pointer structure to the *fortran* environment.

3.3 Data Handling

Once the Data Receiver has signalled that a new dataset is available, Data Handling reads the data and frees the mutex for writing to the common variable again. The raw data must now be broken down to significant data. The text is searched for known data sentences and these are extracted. Data is stored in a data type which is defined for every different NMEA sentence. Since the frequency of GPS data and other sensors varies, several values of the same type might be contained in a raw dataset. It is also possible that information with a low frequency is just present every other dataset or even less. Data Handling is therefore fairing the data in a way, that only one mean value is stored if the frequency is high. On the other hand if some data is missing, the value is interpolated as soon as the next reading of that same kind is available. This leads to a complete set of data for every recorded GPS position which is stored using a linked list. Every node of the list contains a dataset which belongs to a specific point of time and a position of the vessel.

Except for sorting and storing of the data the Data Handling calculates values required for further processing. This includes drift angle, true wind velocity and angle or conversion from GPS WGS84 system to east-north coordinates. But not only geometric conversions are done, but also additional information that assists the user in evaluating the situation. This might include the mean ship speed or distance travelled during speed trials, the change of heading or temporarily diameter of a turning circle or other helpful data during manoeuvres. This additional information is also stored in the linked list. As soon as all data is stored the process signals to the Graphical Output that a new dataset is available and can be displayed. This is the reason why a dataset ends with the current position, so the display is updated as soon as a new waypoint is available and latency time is kept short.

This thread not only calculates additional information, it also helps to evaluate the recorded data. During manoeuvre different actions have to be undertaken often in very short time periods. For example change of heading and rudder angle at a 10/10 ZigZag test or manual readings of sensors which could not be integrated into the automatic system. This leaves little time for the operator to keep an eye on plausibility of the values or changing weather conditions. Automatic evaluation of data should assist to identify problems early. This can be the monitoring of speed, rudder or drift angle, wind speed, wind angle or revolution per minute of the propeller shaft. Fluctuations can easily be detected and displayed. Especially only short but harsh changes are a problem for correcting speed trials. If a strong blast of wind occurs in head wind condition the ship is slowed down and has to accelerate again which needs extra propulsion power. An instance like this is not accounted for in any correction method because they all require steady conditions.

For a small and rather fast vessel an extreme example of unfavourable conditions is shown in Figure 3. With a course directly approaching the waves no severe influence on speed was observed, even though the drift angle of the ship was about 3 degrees. During the counter run while the ship approached a situation with the waves coming from the aft, the ship's speed differed more than one knot during the run and drift angles of more than eight degrees occurred several times. Such major changes in speed might be observed during trials, but an alternating drift angle might as well not be. Therefore an automatic monitoring of recorded values has proven to be very helpful

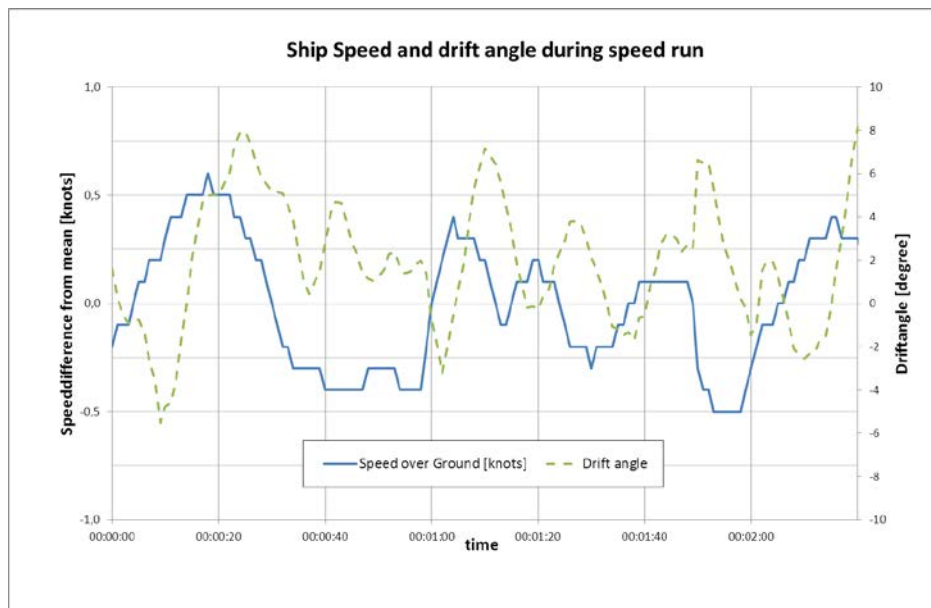


Figure 3: Example of unfavourable conditions during sea trials

The correction routines used for speed corrections are also used during recording in a simplified way. Some measurements like water current are not accurately available before a counter run has been undertaken. Nevertheless a correction of ship speed during the run can help to check the run for plausibility. This routine would also be the core for an on-board performance monitoring because it can calculate the propulsion power for current conditions and compare it to the fuel consumption. This is not yet implemented and a future step to go.

3.4 Graphical Output

The display of a simple and clearly structured user interface is the task of the fourth and last thread of the software. All information necessary to evaluate the manoeuvre needs to be visible. In Figure 4 part of the desktop for recording of a turning circle is shown. The biggest space is used for a map display with a grid size which fits to the turning circle and not degrees of coordinates. The ship's track is plotted in red and additional waypoints are visible. For example the begin of pre run to ensure steady condition, the start of the manoeuvre when the rudder left amidships position and beginning of steady-phase of the turn when the diameter of the turning circle stays constant. Also positions are displayed where the ship's heading had changed for 90, 180 and 270 degree. The black circle displays the turning circle at the current position. Deviation from ship's track is an indication for current. In the upper part general measurement values are displayed, as well as specific information on the manoeuvre.

Next to the map a time history for selected values is displayed, which is not shown in this figure. These include speed, drift, rudder, depth and wind. This makes it easy to keep an eye on steadiness of parameters. It has been found helpful if the scale of the axis adjusts automatically and related to the task. Deviation of 0.2 knots during speed trials is much more important to see than during ZigZag manoeuvre. This also helps to achieve good results.

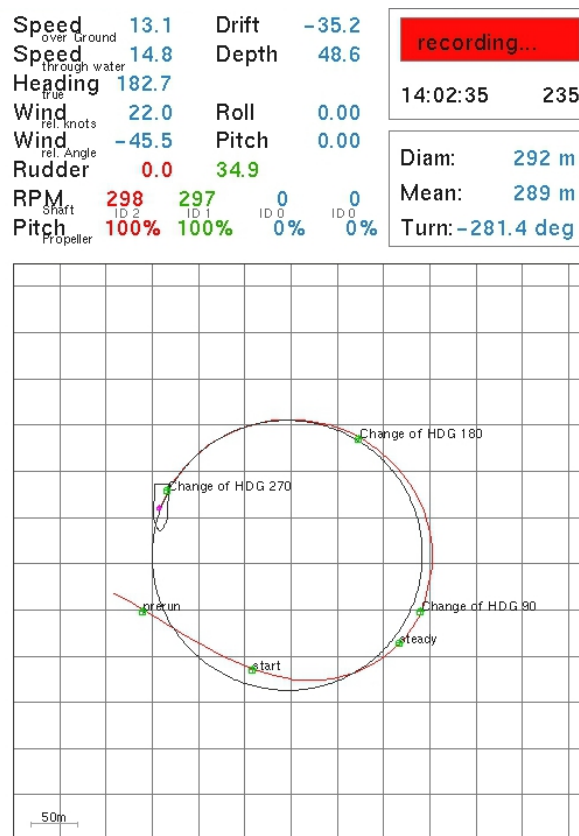


Figure 4: Display for recording Turning Circles. Begin of steady phase, change of headings (90°, 180°, 270°) and momentary ideal circle are displayed.

4 Conclusion

For analysis and correction of a trial trip and performance monitoring a large amount of measured data is needed. Since infrastructure varies on a large scale between different ships, the system to record and analyse the data has to be very flexible in connection and data format. Often external sensors have to be installed on board of the ship to deliver a satisfactory variety of data. These also need to be connected to the software. The software then has to cope with different input and data formats.

The user interface has to be simple structured and intuitive to use because time is usually quite short between manoeuvre actions during trials. Only information necessary for that test should be displayed and possible user action reduced to a minimum. Real time evaluation of the software assists the operator by displaying selected additional information. Plausibility check and monitoring of fluctuations are further useful functions. Right after finishing of the test major characteristic factors are displayed. The success of a test can be monitored right away.

A more accurate analysis tool is used for correcting and analysing the recorded data afterwards using widely accepted and transparent methods. Results can immediately be printed in a standardised report or exported to other systems.

This leads to a more efficient performance of trial trips and reduces the danger to overlook errors while at sea. The necessity to maybe repeat a test is identified instantaneously.

Further development of the software can lead to a powerful tool for performance monitoring on board of ships.

References

- [Blendermann 1996] BLENDERMANN, W: Wind loading of ships - collected data from wind tunnel tests in uniform flow, Schriftenreihe Schiffbau Bericht 574, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1996
- [DIN 81208] DIN 81208: *Manoeuvring of ships*, DIN Deutsches Institut für Normung eV, DIN 81208:2005, 2005
- [DIN 19019] DIN EN ISO 19019: Sea-going vessels and marine technology-Instructions for planning, carrying out and reporting sea trials, DIN Deutsches Institut für Normung eV, ISO 19019:2005, 2005
- [ISO 15016] ISO 15016: Ships and marine technology – Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data, ISO15016:2002(E), 2002
- [ITTC 2005] ITTC: *Analysis of Speed/Power Trial Data*, International Towing Tank Convention, Specialist Committee on Powering Performance of 24th ITTC, 2005
- [KREITNER 1939] KREITNER, J: Heave, Pitch and Resistance of Ship in a Seaway", TINA, 1939
- [Lackenby 1963] LACKENBY, H.: The effect of Shallow Water of Ship Speed. The Shipbuilder and Marine-Engine Builder, 1963
- [NMEA 0183] NMEA 0183: Standard for Interfacing Marine Electronic Devices, Version 4.00, International Marine Electronics Association, 2008
- [ZHOU 1989] ZHOU, Y.: *Bestimmung der im Seegang zusätzlich erforderlichen Antriebsleistung von Schiffen*, Schriftenreihe Schiffbau Bericht 470, Technische Universität Hamburg Harburg

Investigation of Propeller Ventilation with Viscous-Flow Methods

Dipl.-Ing. Katja Wöckner-Kluwe,*

Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory
Schwarzenbergstraße 95C, 21073 Hamburg, Germany
*e-mail: katja.woeckner@tu-harburg.de

1 Introduction

Large amplitude ship motions in heavy seas can lead to a sudden partial or full emergence of the propeller. Moreover in cases with small forward speeds or high propeller loadings, even a nominally submerged propeller starts to ventilate and large amounts of air are transported towards the blades. During a ventilation event parts of the propeller blades are working in air or in water which is strongly enriched with air bubbles. This yields large oscillations in thrust and torque, which might damage the mechanical parts (i.e. the gear).

The paper in hand is based on simulations of an open-water propeller, which operates in the vicinity of the free surface to investigate the above described phenomena. The aim of the computations is to study the occurrence of ventilation in response to different immersion ratios and advance coefficients. This study is part of a joint German/Norwegian research project called PROPSEAS, which tries to address the ventilation phenomena with the help of simulations, experiments and full-scale measurements. The simulations are performed with the in-house RANS-code *FreSCo*⁺ and compared to experiments carried out by the Norwegian model basin MARINTEK. The analysis of the results contains a comparison of the flow-visualisation as well as the obtained forces and moments. Furthermore, the paper will address the challenging aspects in this type of simulations and the difficulties in comparing the computed results with experiments.

2 Description of ventilation

Ventilation is traditionally only investigated for surface-piercing propellers (6), but can also happen for conventional propellers when the ship is acting in heavy seas. If a propeller is ventilating, parts or even the whole propeller are working in air. Especially in cases of small forward speeds or high propeller loadings, ventilation can lead to very harmful load variations.

However, ventilation does not only occur if the propeller emerges, it can also happen if the propeller is operating in the vicinity of the free surface. In these cases two different possibilities for ventilation inception are described: In the first mode an air-filled vortex is formed, which connects the suction side of the blade and the free surface. Through this vortex large amounts of air are transported towards the propeller blades and the propeller becomes partially ventilated. In the second mode, when the propeller is located close to the free surface, the surface is sucked down by the propeller and then the propeller blades start to pierce the surface, which leads to a full ventilation of the propeller. More details on the different ventilation forms can be found in (1).

The parts of the blades, which become "dry" during the ventilation event do not generate thrust. Depending on the amount of ventilation thrust losses up to 100% of the thrust generated by a non-ventilating propeller are observed, as investigated by Koushan (2). He also deems the partial ventilation more harmful for the mechanical parts due to the larger load fluctuations. Furthermore it is found that ventilation is

a highly unsteady phenomena with different possible flow characteristics during a single experiment (3). Due to the complexity of the flow and the resulting large computational effort, numerical simulations of propeller ventilation are confined to a few rare examples (4), (5). On the other hand experiments are also challenging, as complex measurement devices are necessary to investigate for example the single blade loads. A benefit of computations is the possibility to perform full-scale investigations, which is one of the scopes of the PROPSEAS project. Due to the higher circumferential velocities in full-scale the fluid pressure on the suction side is expected to be lower than in model-scale. From this it can be concluded, that ventilation can more often occur in full scale. (see (6) for more details)

3 Computational approach

The computations presented in this article are obtained with the in-house finite-volume RANS solver *FreSCO⁺*, jointly developed by the Hamburg Ship Model Basin (HSVA) and the Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory of the TUHH (7). The segregated algorithm is based on the strong conservation form of the momentum equations and employs a cell-centred, co-located storage arrangement for all transport properties. The procedure can be used in conjunction with structured and unstructured-grids, based on arbitrary polyhedral cells or hanging nodes. The implicit numerical approximation is second-order accurate in space and time. Integrals are approximated using the conventional mid-point rule. The solution is iterated to convergence using a SIMPLE-type pressure-correction scheme.

For the simulation of the free surface a volume of fluid (VoF) method is applied. Henceforth, the computational domain contains the water as well as the air phase and the amount of air in a cell is determined by an additional transport equation. To account for the rotations of the propeller, the moving-grid feature of the *FreSCO⁺* suite is applied. Multiple grid approaches are not necessary, as the whole domain is moving with the propeller. Thus, the propeller is modelled in a cylindrical domain, as shown in Fig. 1. According to the experiments, the propeller is investigated in pulling conditions. Hence, the plane in the front of the figure is the inflow boundary and a constant inflow velocity is applied here. The plane coloured in blue is the outflow boundary, which is modelled as pressure boundary. Overall the domain has a diameter of $10D$ and a length of $10D$, while approximately $4D$ are located upstream of the propeller.

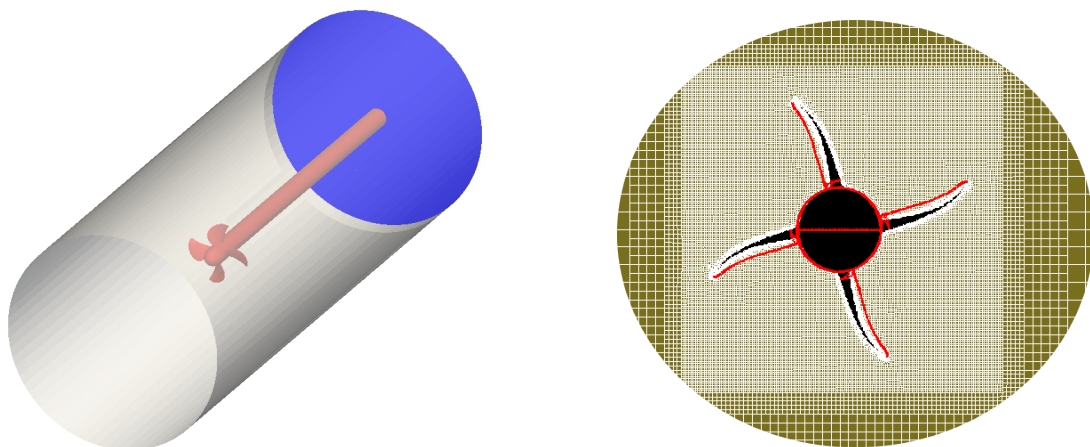


Figure 1: Sketch of the computational domain (left), and illustration of the grid in the propeller plane (right) indicating the refinements around the blades and in the potential free surface regions.

Simulations are performed with an unstructured hexaedral grid using local refinement around the propeller blades and in the free surface regions (Fig. 1). Overall the grid has approximately 2.8 mio cells. As the whole domain is moving the refinement is placed around the propeller. The investigated propeller has a diameter of $D = 0.2m$ and operates with a constant number of revolutions ($n = 18 \text{ 1/s}$). Accordingly, surface-tension influences are negligible due to the high Weber-number. Different advance coefficients are achieved by a variation of the inflow velocity. The investigated cases refer to a Reynolds-number about $Re = 1.1 \cdot 10^6$, based upon the chord length at 70% of the diameter. Furthermore, the volume fraction has to be initialised correspondent to the prescribed immersion ratio. Therefore the immersion ratio is defined according to Fig. 2.

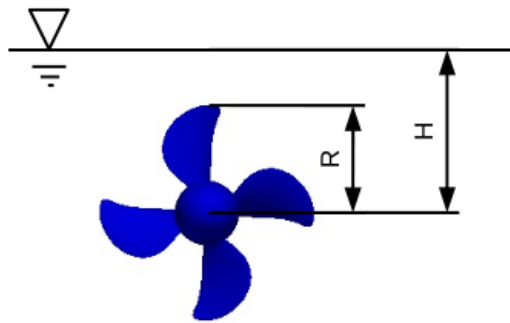


Figure 2: Definition of the immersion ratio

As described before, the computational effort for time-accurate simulations is very large, although the simulations are parallelised on 16 processors using a domain-decomposition technique based on a Single Program Multiple Data (SPMD) message-passing model. The inter-processor communication uses the MPI communications protocol, while the ParMETIS partitioning software is used to achieve load balancing between the single processors. To reduce the computational effort, only laminar calculations are performed to investigate the ventilating propeller. Ventilation is mainly influenced by the low pressure region near the free surface. For this mechanism turbulence is not important as reported in (6).

4 Results of the computations

Before investigating the influence of the free surface on the propeller, the propeller is investigated in deeply submerged open-water condition for validation purposes. Here no ventilation occurs and unique values are obtained for the single advance coefficients. For these computations a simpler grid with approximately 800k cells is used, as no refinement for the free surface is necessary. Simulations are performed for both, laminar and fully turbulent flow conditions. The latter was computed in conjunction with the Wilcox (8) $k-\omega$ turbulence model and a wall-function approach. The resulting y^+ -values are in the regime $20 \leq y^+ \leq 60$. A comparison of the computed open water characteristics for both cases to the experimental values can be found in fig. 3. The laminar values are approximately up to 8% larger (light green curves).

Overall a good agreement is observed between the turbulent $FreSCo^+$ results displayed with the dark green curves and the experimental results (red curves). Only the values for the open water efficiency are slightly under-predicted by $FreSCo^+$ at the larger advance coefficients due to the increased torque values. The deeply submerged values are in the following used to normalize the obtained thrust values

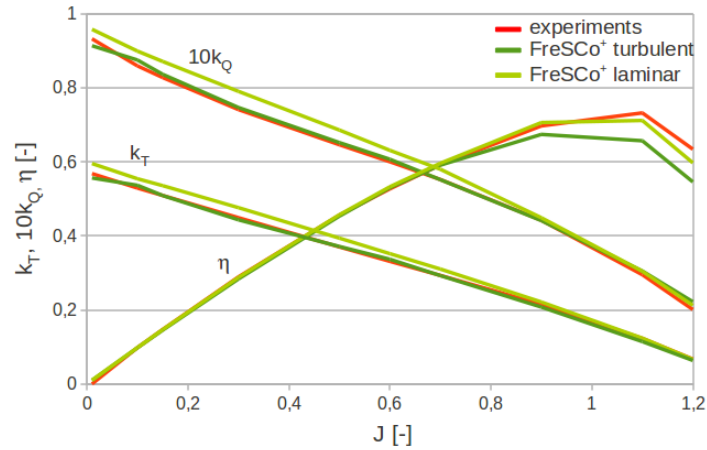


Figure 3: Open-water diagram for the deeply submerged propeller.

of the free surface cases. Thus the thrust losses in ventilation condition are displayed in percent of the deeply submerged values:

$$\frac{k_T}{k_{T_0}} = \frac{T}{\rho n^2 D^4 k_{T_0}} \quad \text{with} \quad k_{T_0} = \frac{T_0}{\rho n^2 D^4} \quad (4.1)$$

In this equation T_0 and k_{T_0} refer to the values obtained for the deeply submerged propeller. The symbol D is used for the propeller diameter, n is the number of revolution (rps) and the water density is depicted as ρ .

4.1 Influence of the advance ratio

Different advance coefficients are simulated to investigate the influence of the propeller loading on the amount of ventilation. During this computations the immersion ratio is assigned to a constant value of $H/R = 1.5$. The investigated advance coefficient vary from bollard-pull conditions ($J = 0.01$) to $J = 1.2$. The propeller is expected to ventilate for the smaller advance coefficients, while no ventilation will occur for the larger ones. To analyse the results, the free surface contour around the propeller is visualized in Fig. 4 for different advance coefficients (*i.e.* $J = 0.01$, $J = 0.15$, $J = 0.3$, $J = 0.6$).

The single figures show the propeller at one instant in time after the first couple rotations. The figure depicts a contour plot of the free-surface elevation for the nominal air-water surface ($c = 0.5$). The propeller itself is coloured with the air-volume fraction. Ventilation is visible for the two smallest advance coefficients. Here the free surface is sucked down by the propeller and a blade becomes partly ventilated, when it leaves the topmost position. But on the way down, the blade loses the contact to the free surface and fully wetted blades are visible after passing the lowest position for all cases. The influence of the propeller on the free surface becomes smaller, if the advance coefficient is further increased and above an advance coefficient of $J = 0.6$ nearly no deformation of the free surface is visible. Thus a clear dependency of the advance coefficient on the amount of ventilation can be seen.

Analogues to that, the occurrence of ventilation is also visible in the predicted thrust values. Figure 5 shows the calculated blade thrust ratio k_T/k_{T_0} over the blade position. The red dots depict the results for $J = 0.01$. Here thrust losses up to 80% can be found near the upright position, while nearly no thrust losses are obtained in the lowest position. The thrust losses become smaller when the advance

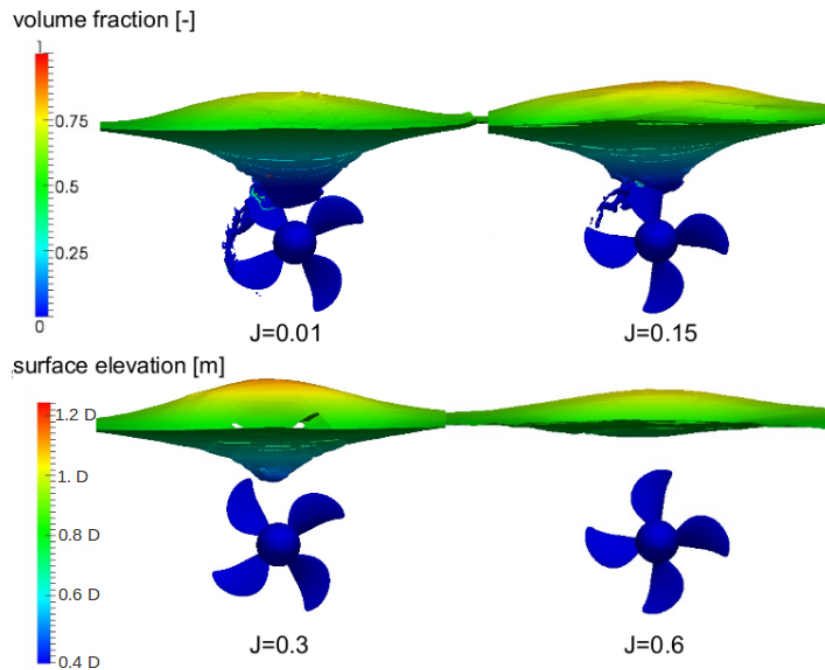


Figure 4: Flow visualisation for different advance coefficients and a constant immersion ratio of $H/R = 1.5$.

ratio is increased to $J = 0.15$ (black dots) and nearly a constant thrust over one rotation is predicted for $J = 0.3$.

4.2 Influence of the immersion ratio

Secondly, the influence of the immersion ratio is investigated. Next to the simulated immersion ratio beforehand, two smaller immersion ratios ($H/R = 1$ and $H/R = 0$) are simulated. In case of $H/R = 1$ the blade tips touch the free surface in the initial stage, while in case of the smallest immersion ratio, half of the propeller is dry in calm water conditions.

Screenshots of the obtained free surface contour for a constant advance coefficient of $J = 0.3$ are displayed in Fig. 6. Again the propeller blades are coloured with the volume fraction, while the free surface is coloured with the resulting elevation. For comparison, the previously investigated immersion ratio of $H/R = 1.5$ is shown on the left. Due to the shorter distance between the free surface and the propeller tips, the propeller starts to ventilate if the immersion ratio is reduced to $H/R = 1$ and the blade becomes surface piercing near the upper position. But analogues to the before investigated cases, the blade becomes wetted after passing the lowest position. Due to the static immersion and the resulting ventilation of the propeller in case of $H/R = 0$ the blades are completely out of water in the upper positions and also the blades near the lowest position are not fully wetted.

The computed blade thrust ratios along the angular position for these three cases can be found in Fig. 7. Again a clear correlation can be found between the amount of ventilation on a blade and the thrust losses. The red dots show the results for the smallest immersion ratio. In this case no thrust is generated if the blade comes out of water, while near the lowest position a thrust recovery up to 60% can be found due to the still ventilated blades. In case of the partly ventilated propeller ($H/R = 1$, black dots), large

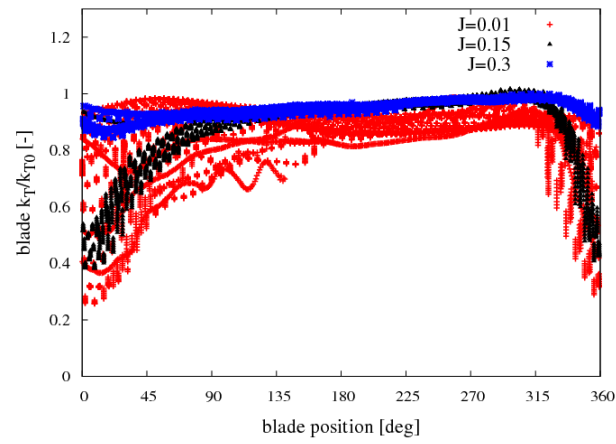


Figure 5: Computed blade thrust ratio for the three smallest advance coefficients at $H/R = 1.5$.

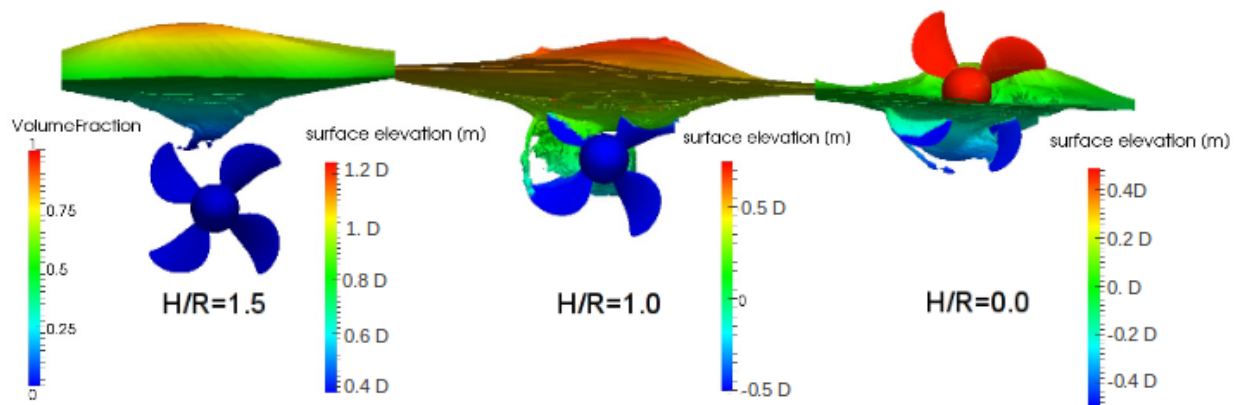


Figure 6: Flow visualisation for three different immersion ratios and a constant advance coefficient, which is equal to $J=0.3$.

thrust losses are computed near the topmost position, while nearly the full blade thrust is generated near the lowest position. Thus, a large variation of the thrust is again observed during one revolution of the propeller. The blue dots show again the results for the largest immersion ratio, where nearly no ventilation can be found.

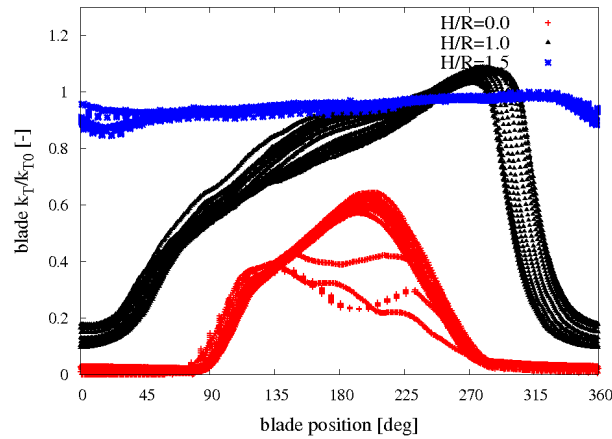


Figure 7: Computed blade thrust ratios for the different immersion ratios. The advance coefficient is kept constant to $J=0.3$.

5 Comparison to measurements

As indicated in the introduction, the simulated results could be compared to experiments performed by MARINTEK in Norway. In the experiments the propeller is mounted on an open water test rig. Flow visualisation is obtained with two high-speed cameras one located above the free surface and one below. The forces and moments on the propeller as well as on a single blade are measured. Thus also the single blade values can be compared to the computations. More details on the experiments and on the used sensors can be found in (3) and (9).

The left picture of Fig. 8 depicts the comparison for $J = 0.15$ and $H/R = 1.5$. The results of the simulations are displayed in green, while the measurements are represented by the red dots. Similar to the results presented before, the thrust losses are displayed over the blade position. The magnitude between minimum and maximum thrust is almost equal in the experiments and the simulations. But a stronger variation over one rotation is observed in the computations with nearly no differences between the single rotations. In the experiments the thrust losses are almost constant over one rotation, but different levels of thrust loss can be found depending on the time of the experiment. During ventilation periods, the whole propeller is covered with air (Fig. 8, right) in the experiments, while the blade loses contact to the free surface behind the lowest position in the simulations (upper right picture of Fig. 4).

The left picture of Fig. 9 shows a comparison between experiments and computations for an advance coefficient of $J = 0.3$. The picture depicts that different levels of thrust loss are again obtained in the experiment, while only small variations are visible within one rotation. The computed results are in the upper regime of the measured values, where the propeller does not ventilate. The corresponding time series of the experiment can be found in the right picture. Here it becomes clear, that in the beginning of the experiment, the flow changes very rapidly between ventilation phases and non-ventilating phases, while stable ventilation occurs only after a longer time of the experiment. Thus it is possible that the

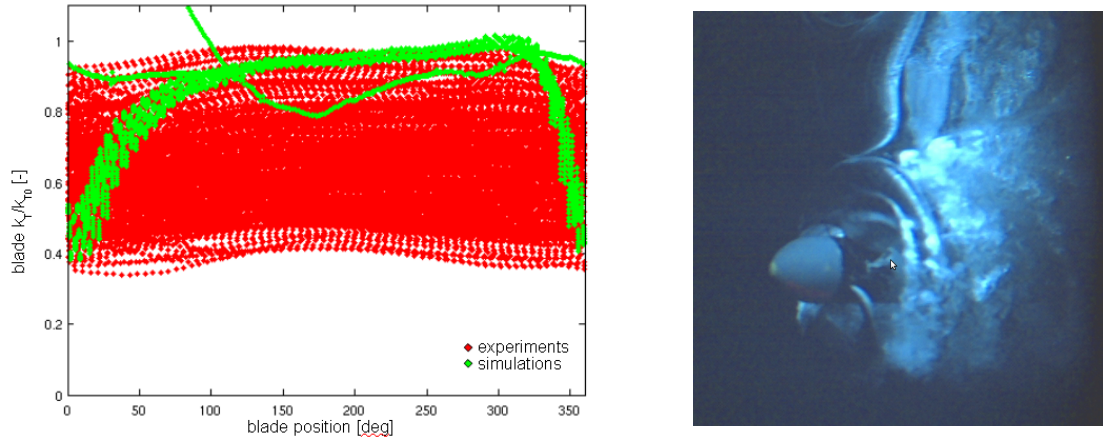


Figure 8: A comparison between measurements (red) and simulations (green) for an advance coefficient of $J = 0.15$ and an immersion ratio of $H/R = 1.5$ (left) and a photo from the experiments for the same case (right).

results of the computations show only one possible solution for the behaviour of the propeller and longer simulation times would be necessary to predict also the other forms.

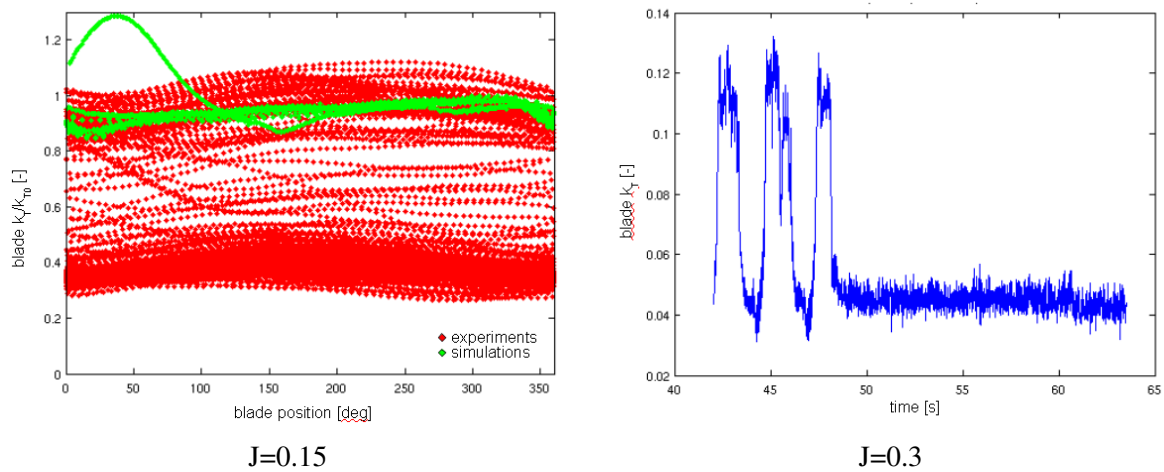


Figure 9: The comparison between measurements (red) and simulations (green) for an advance coefficient of $J = 0.3$ and an immersion ratio of $H/R = 1.5$ is shown on the left. The right picture displays the measured time series of the blade thrust coefficient.

6 Conclusion

The numerical simulation of propeller ventilation is presented in the present paper. According to the experimental results, a clear dependency can be found between the amount of ventilation and the predicted thrust losses. Furthermore the amount of ventilation depends on the propeller loading and of course the immersion ratio in an expected way. While the simulated results are in line with the experiments for the deeply submerged propeller, large deviations in the thrust losses are observed for the ventilation cases.

The flow visualisation shows a substantially larger amount of air in the water during the measurements than in the computations. In the experiments the whole propeller is surrounded by air when the propeller ventilates. As opposed to this, the blade loses the contact to the free surface before it reaches the lowest position in the computations.

Results reveal that a rational comparison between simulation and experiments is difficult: Due to the large computational effort it is not possible to simulate more than a few (10-15) revolutions, while in some experiments stable ventilation starts after a significantly higher number of revolutions. Henceforth, only one possible ventilation form can be predicted in the simulations, while different thrust levels are observed in the experiments. Furthermore equivalent initial conditions can not be realised. In the simulations the propeller starts with the full number of revolutions and the flow is initialised with the nominal inflow velocity, while both values are increased to the full value in the beginning of the experiment. Additionally it is possible that an amount of liquefied gas is available in the tank water, which is not existing in the simulations. Future work will try to address the aforementioned phenomena by a numerical model which considers the amount of non-condensable gas in the water.

7 Acknowledgement

This work was carried out as a part of the MARTEC Research Project PROPSEAS, funded by the German federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and the Research Council of Norway. Partners in the project are MARINTEK, Rolls-Royce, Norwegian University of Science and Technology, Hamburg University of Technology, University of Duisburg-Essen, Germanischer Lloyd, Farstad Shipping and Develogic GmbH.

8 References

- [1] A. Kozłowska, S. Steen and K. Koushan: *Classification of Different Type of Propeller Ventilation and Ventilation Inception Mechanism*, First International Symposium on Marine Propulsors (SMP09), Trondheim, Norway, 2009
- [2] Kourosh Koushan: *Environmental and interaction effects on propulsion systems used in dynamic positioning, an overview*, 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Luebeck-Tavemünde, Germany, 2004
- [3] A. Kozłowska, K. Woeckner, S. Steen, T. Rung, K. Koushan and S. Spence *Numerical and Experimental Study of Propeller Ventilation*, Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP11), Hamburg, Germany, 2011
- [4] A. Califano and S. Steen: *Analysis of different propeller ventilation mechanisms by means of RANS simulations*, First International Symposium on Marine Propulsors (SMP09), Trondheim, Norway, 2009
- [5] M. Palm, D. Juergens and D. Bendl: *Numerical and Experimental Study on Ventilation for Azimuth Thrusters and Cycloidal Propellers*, Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP11), Hamburg, Germany, 2011
- [6] Califano, Andrea: *Dynamic loads on marine propellers due to intermittent ventilation*, Ph.D.-thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2010
- [7] T. Rung, K. Woeckner, M. Mancke, A. Stueck, J. Brunswig and C. Ulrich: *Challenges and Perspectives for Maritime CFD Applications*, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 2009

- [8] Wilcox, D. C.: *Turbulence Modeling for CFD* DCW Industries, Inc., 1993
- [9] K. Koushan, S. Spence, L. Savio *Ventilated Propeller Blade Loadings and Spindle Moment of a Thruster in Calm Water and Waves*, Second International Symposium on Marine Propulsors (SMP11), Hamburg, Germany, 2011

RANS Simulations Using Overset Meshes

Dipl.-Ing. Joerg Brunswig*

Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory
Schwarzenbergstraße 95C, 21073 Hamburg, Germany
*e-mail: joerg.brunswig@tu-harburg.de

1 INTRODUCTION

Flows around multiple bodies with relative motion require either dynamic meshes or multiple rigid meshes using a grid coupling technique. The sliding interface method is restricted to simple types of motion, like pure rotations. The overset grids approach is more versatile with respect to degrees of freedom and was therefore chosen to be implemented into our in-house simulation tool FreSCo⁺.

2 NUMERICAL METHOD

2.1 FreSCo⁺

The finite volume-based RANSE code FreSCo⁺ is a spin-off of FreSCo, a joint development of Hamburg University of Technology (TUHH), Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) and Maritime Research Institute Netherlands (MARIN). The original code was developed within the scope of the EU initiative VIRTUE. The procedure uses a segregated algorithm based on the strong conservation form of the momentum equations. It employs a cell-centered, co-located storage arrangement for all transport properties. Structured and unstructured moving and deforming grids, based on arbitrary polyhedral cells or hanging nodes, can be used. The ALE-type implicit numerical approximation is second-order accurate in space and time. Integrals are approximated using the conventional mid-point rule. The solution is iterated to convergence using a SIMPLE-type pressure-correction scheme. Various turbulence-closure models are available with respect to statistical (RANS) or scale-resolving (LES, DES) approaches. Two-phase flows are addressed by interface-capturing methods based upon the Level-Set or Volume-of-Fluid (VOF) technique. Since the data structure is generally unstructured, suitable pre-conditioned iterative sparse-matrix solvers for symmetric and non-symmetric systems (e.g. GMRES, BiCG, QMR, CGS or BiCGStab) can be employed. The algorithm is parallelised using a domain-decomposition technique based on a Single Program Multiple Data (SPMD) message-passing model, i.e. each process runs the same program on its own subset of data. Inter-processor communication employs the MPI communications protocol. Load balancing is achieved using the ParMETIS partitioning software.

2.2 Overset Grids

The overlapping grids technique implemented in FreSCo⁺ refers to the mass-conservative approach described by Hadzic (2005). More information can also be found in Brunswig et al. (2009) and Brunswig et al. (2010). The grid coupling is realized by interpolating field values ϕ from a donor grid to a cell center on a target grid using a generic interpolation equation:

$$\phi_{target} = \sum_{i=1}^n w_i \phi_i + \delta. \quad (2.1)$$

The ϕ_i denote the field values at the n donor cells of the target location, the w_i are the associated interpolation weights. The parameter δ contains the part of the interpolation equation which can not be expressed as weighted sum of field center values. In higher-order methods, this term is a function of the gradients of the interpolated field. Three different interpolation methods are available: a single donor cell value with a gradient-based correction term (1st-order) and a 1st-order and 2nd-order method with simplex-based interpolation stencils. The 1st-order simplex method only uses field values, the 2nd-order method also involves field gradients and is implemented using a deferred-correction technique. For the simulations presented in this paper, the 2nd-order simplex interpolation scheme was used for the velocity field, the 1st-order simplex method was used to couple the pressure correction field. Because the equations of all grids are assembled into one equation system, the grid coupling can be formulated implicitly (strong coupling), meaning that the weighted sum of cell center field values forms the coefficients of the system matrix, while the explicit part δ , if present, becomes the right-hand side of the equation system. For cells which interpolate their value from the field on the donor grid, the RANS equation is replaced by equation (2.1). The implicit interpolation of the field ϕ is realized by replacing the according row of the equation system by a new row containing unity as coefficient of the main diagonal and the $-w_i$ with $\sum w_i = 1$ as off-diagonal coefficients. For explicit interpolations between two grids, equation (2.1) can be evaluated directly. This technique is used for the calculation of gradients at interpolation cells.

Pressure Correction

Equation (2.1) can be used directly to couple fields like velocity components or turbulent quantities. A special treatment is required with respect to the pressure correction equation, though. The reason is that the interpolation equation leads to equal field values on the donor and receptor grid for a given location, if interpolation errors are not present. If the pressure values on the two grids are not the same at a given location (e.g. due to relative grid motion), equation (2.1) will not be able to reduce the decoupling of the pressure field on the two grids. Instead, it will enforce the same value for the pressure correction field. The interpolation equation for the pressure field reads

$$p_{target} = \sum_{i=1}^n w_i p_i + \delta(p^*). \quad (2.2)$$

p_{target} and p_i are the new values of the pressure field at the target cell and the donor cells. The explicit part of the interpolation equation is a function of the pressure field from the previous iteration p^* . Introducing the pressure correction field leads to

$$p_{target}^* + \gamma p'_{target} = \sum_{i=1}^n w_i (p_i^* + \gamma p'_i) + \delta(p^*). \quad (2.3)$$

The p'_i and p'_{target} denote the pressure correction values at the target and donor cells. The pressure corrections are applied using an underrelaxation factor γ , compare Ferziger and Perić (2002). To obtain the modified interpolation equation, the pressure corrections are brought to the left-hand side, the values of the old pressure field form the right-hand side of the equation:

$$p'_{target} - \sum_{i=1}^n w_i p'_i = \frac{1}{\gamma} \left[\sum_{i=1}^n w_i p_i^* + \delta(p^*) - p_{target}^* \right] \quad (2.4)$$

Mass Conservation

Due to the fact that the finite-volume method is based on a flux balance over each cell, it is inherently conservative with respect to the transported quantities. Direct interpolation of field values from a donor grid to a target cell center violates this approach, which may be an issue especially for the conservation of mass. Although the problem can be reduced by using a higher-order interpolation scheme for the velocity field, it can not be entirely eliminated. Therefore, the mass imbalance on each grid is monitored by calculating the sum of all mass fluxes through faces between cells with status INTERPOLATE and cells with status SOLVE. A bulk correction for the mass fluxes is applied to these faces. The correction is weighted with the absolute mass flux through a face, compare Hadzic (2005).

Cell Status

Only three cell states are relevant for assembling the equation system: it must be determined whether

- the RANS equations are solved for the cell (status SOLVE) or
- the field value is interpolated from the donor grid (status INTERPOLATE) or
- the cell is switched off (status IGNORE).

The algorithm which determines the cell status must be able to handle an arbitrary number of overlapping grids; this requires assigning a unique priority to each grid. If two grids provide cells in the same area of the solution domain, the cells of the lower-priority grid are switched off, since this part of the domain is covered by the cells of the higher-priority mesh. The only regions where active cells on different grids exist is the area of inter-grid coupling, the overset interface. The second group of cells to be switched off consists of cells in void spaces. In these areas, at least one grid has a hole (usually a solid body). The area outside of the computational domain (that is: outside of the outer boundaries of the background mesh, which has the lowest grid priority) is also defined as void space, see Fig. 1. The first step is to identify cells on all grids lying in a void space and set them to status IGNORE. Then, the algorithm starts a loop from the highest to the lowest priority grid, performing the following steps:

1. Determine which regions of the current grid are covered by a higher-priority grid and mark them with status IGNORE.
2. Set cells next to outer boundaries of foreground grids to status INTERPOLATE, if they are not inside a void space or a region covered by a higher-priority grid. The donor grid of these cells must have a lower grid priority than the current grid. If valid donors can be found on several partner grids, the grid with the highest priority is chosen as donor grid.
3. Remove direct transitions between solved cells and void cells by setting the adjacent solved cells to status INTERPOLATE. The donor grid is the highest-priority grid defining the void space.
4. Remove direct transitions between solved cells and cells in regions covered by a higher-priority grid by setting the latter to status INTERPOLATE. The donor grid is the highest-priority grid covering the region the interpolated cell lies in.

The algorithm ensures that IGNORE cells and SOLVE cells are separated by a closed front of INTERPOLATE cells. This is a very strict requirement, since SOLVE cells rely on correct cell values at all of their neighbours. Another important issue is to avoid cyclic interpolations. An interpolation cell from grid A must not use donors of grid B if some of these donors interpolate values from grid A. These situations can destroy the condition of the system matrix and induce severe stability problems.

There are several possibilities to treat cells which are switched off. To reach the highest efficiency of the solver, they should be removed from the equation system. This is only feasible in situations

where the overlapping interface between the grids does not change during the simulation. Otherwise, the computational overhead to rebuild and reorder all cell and field arrays would decrease the overall efficiency of the algorithm. In simulations with moving grid parts, keeping the cells with IGNORE status in the arrays seems a better approach. The coefficients at these cells can be replaced by a set of coefficients which enforce the solution to be either a given value, e.g. the last value the cell had when it had a different status than IGNORE, or a value interpolated from the foreground grid. All results presented in this paper were generated with IGNORE cells remaining in the equation system, retaining their previous value.

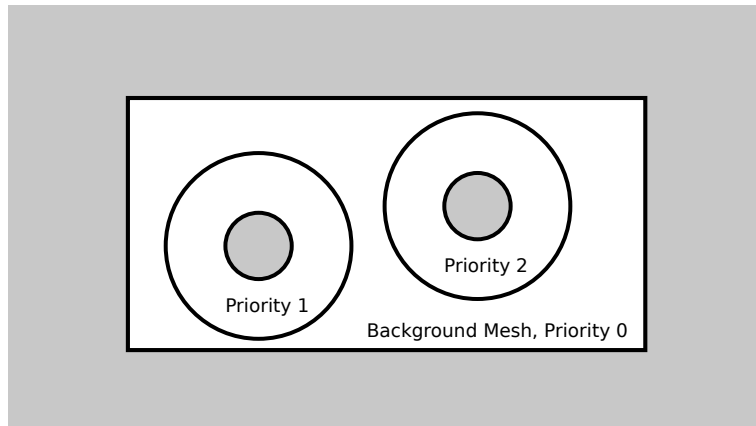
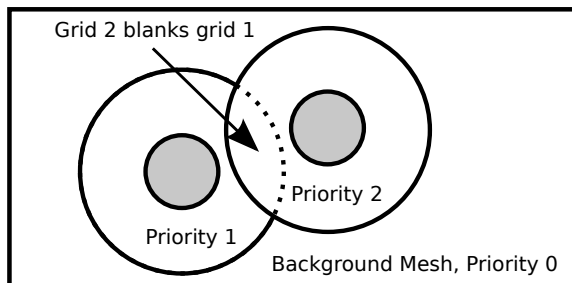
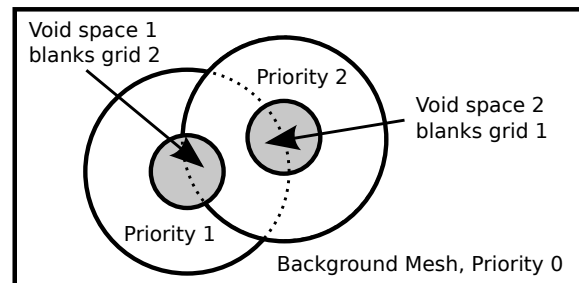


Figure 1: Definition of void spaces (gray areas) on overset grids.



(a) Cell blanking by grid priority.



(b) Cell blanking by void space.

Figure 2: Cell blanking.

3 SIMULATIONS

3.1 Oscillating Cylinder in a Channel

The first testcase is a twodimensional cylinder in a channel performing vertical oscillations. Since the amplitude of the vertical motion was small, it was possible to set up a simulation using the deforming mesh technique and compare the results with those obtained by the overset calculation. The number of cells was 4960 in the overset grids setup, 4544 in the single-grid deforming mesh setup. Figure 3 shows both computational meshes. The 2D channel had a length of 2.2m and a height of 0.41m. The diameter

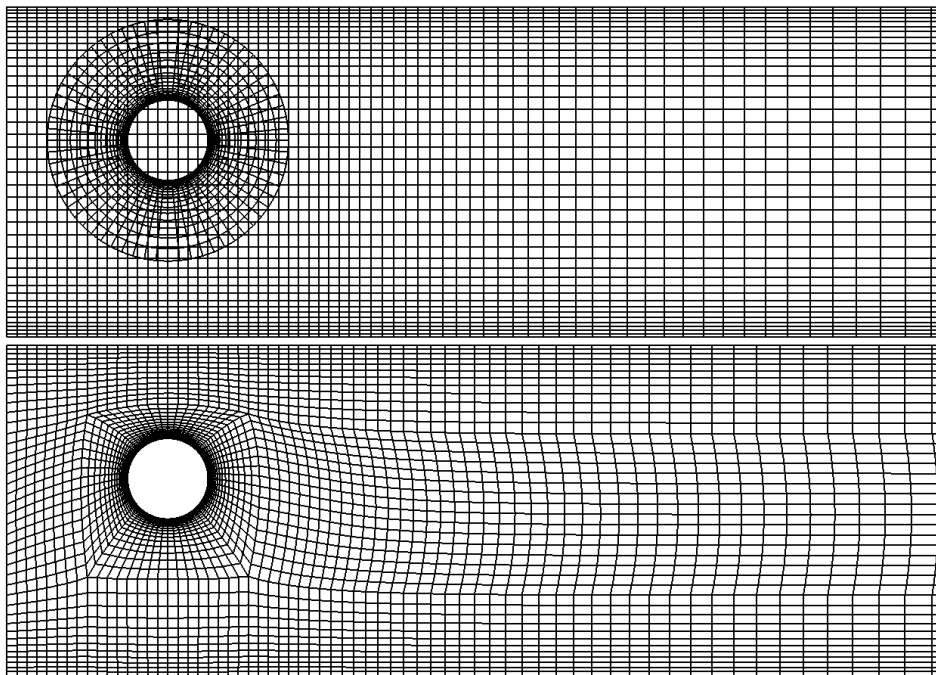


Figure 3: Oscillating cylinder in a channel. Top: overset grids approach, bottom: deforming mesh

of the cylinder measured 0.1m, its center was positioned at a distance of 0.2m from the inlet boundary. The direction of the flow was from left to right, a parabolic velocity profile with a mean velocity of $0.2 \frac{m}{s}$ was prescribed at the inlet boundary. The top and bottom boundaries were defined as no-slip walls, the outlet boundary was set to a pressure boundary condition. The amplitude of the vertical oscillations was 0.05m, the oscillation period was 2.62s. The timestep of both simulations was 0.02s. Figure 4 shows parts of the computational grids and the cell status. Cells with status IGNORE are suppressed, the red symbols mark cells which obtain their value by interpolation from their donor grid. For the remaining white cells the RANS equations are solved. A comparison of the pressure field at $t = 10s$ is shown in Figure 5. The solid color plot represents the overset grids solution, the black isolines were calculated using the deforming mesh solution. Taking into account the relatively coarse discretization, the results of the two simulations show a very good agreement. The differences are even smaller for the velocity fields, see Figure 6. Note that the overset interface does not induce any noticeable deviation of the interpolated fields from the reference solution. The hydrodynamic forces acting on the cylinder in the overset grids simulation also compare very well with the results of the deforming mesh setup, see Figure 7. Figure 8 shows the mass defect measured at the overset interfaces of the background and foreground mesh. The peaks of the imbalance indicate the first outer iteration of a new timestep. It can be seen that

the algorithm efficiently decreases the mass defect over the iterations of a timestep.

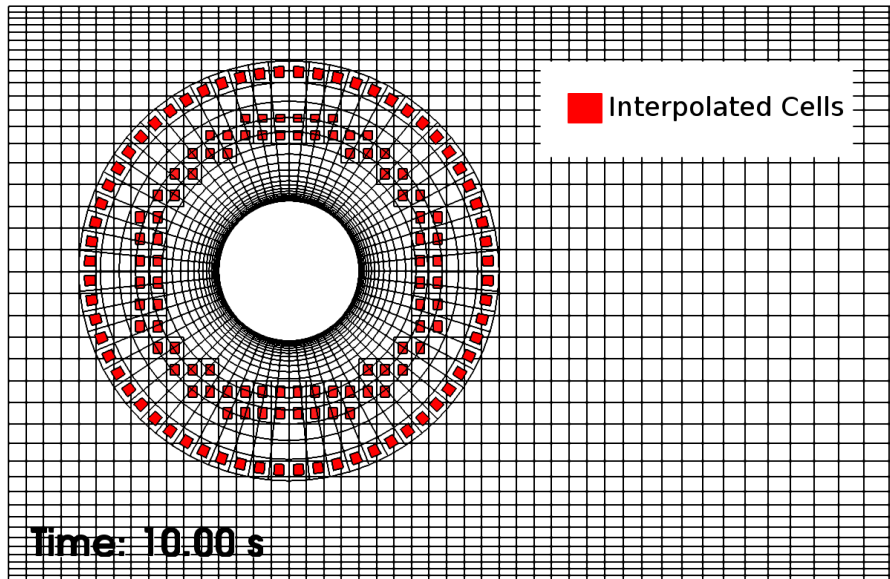


Figure 4: Details of computational grid and cell status.

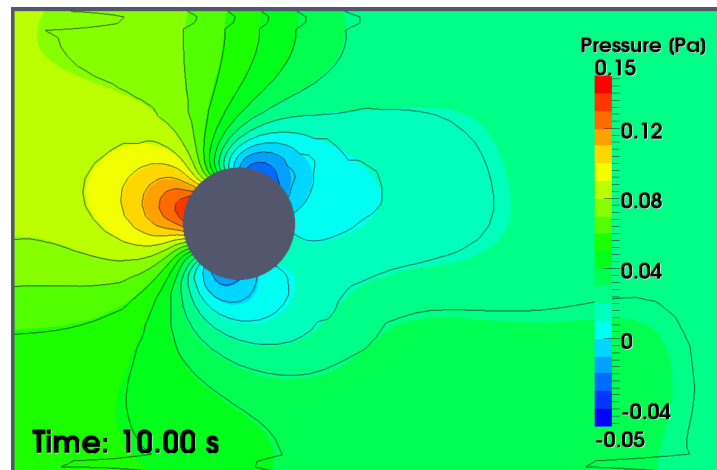
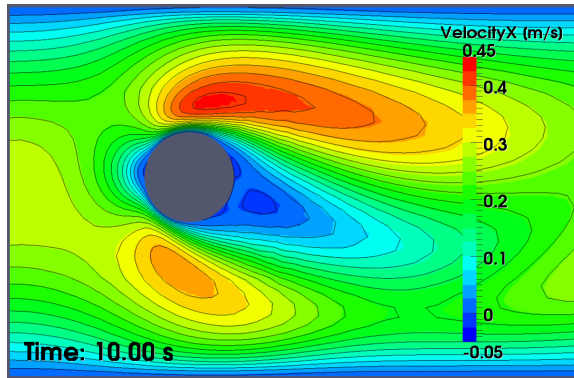


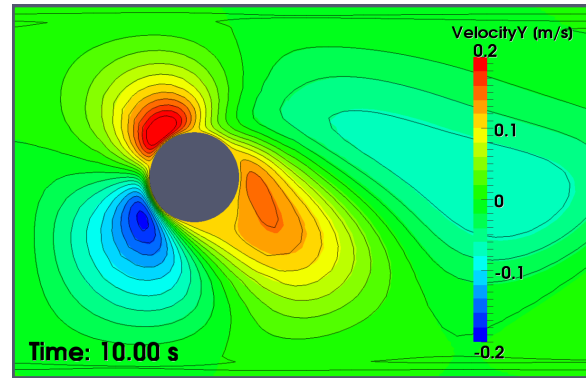
Figure 5: Pressure distribution. Solid color: overset grids, isolines: deforming mesh.

3.2 Two Oscillating Cylinders in a Channel

The setup and the computational grids of this case are similar to the previous testcase. A second cylinder is located 0.2m downstream from the first cylinder. The amplitude of the vertical oscillations is 0.1m, which results in the outer boundary of the cylinder meshes leaving the domain of the background mesh, compare Figure 9. The main purpose of this testcase was to test the overset grids algorithm with multiple overlapping interfaces. Figure 10 shows the pressure field and velocity vectors at $t = 5s$. No problems with respect to cell status determination have been detected during the simulation, the algorithm worked as expected. Although a reference solution to compare the results was not available, the calculated fields

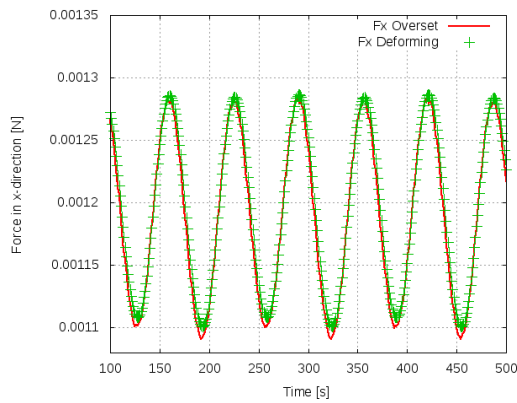


(a) Velocity distribution in x-direction.

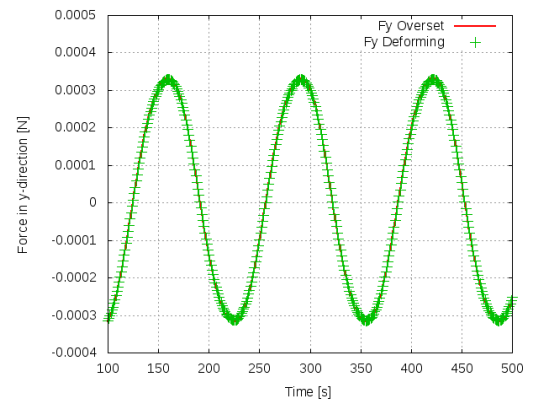


(b) Velocity distribution in y-direction.

Figure 6: Oscillating cylinder. Solid color: overset grids solution, isolines: deforming mesh results.



(a) x-direction.



(b) y-direction.

Figure 7: Forces on oscillating cylinder.

seemed to be reasonable. As in the previous testcase, no field disturbances were observed around the overset grids interfaces.

4 CONCLUSIONS

The overset grids approach was implemented into our in-house simulation tool FreSCo⁺. The results of two transient computations were presented. The first testcase was compared with results from a simulation using the deforming mesh technique showing a very good agreement. The second testcase demonstrated that the algorithm is capable of dealing with multiple overlapping interfaces and void spaces. Results of 3D computations based on the algorithm described in this paper will be presented in the near future.

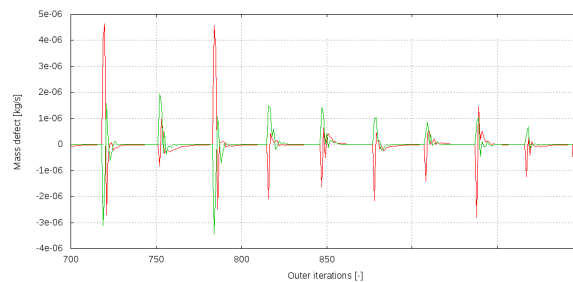


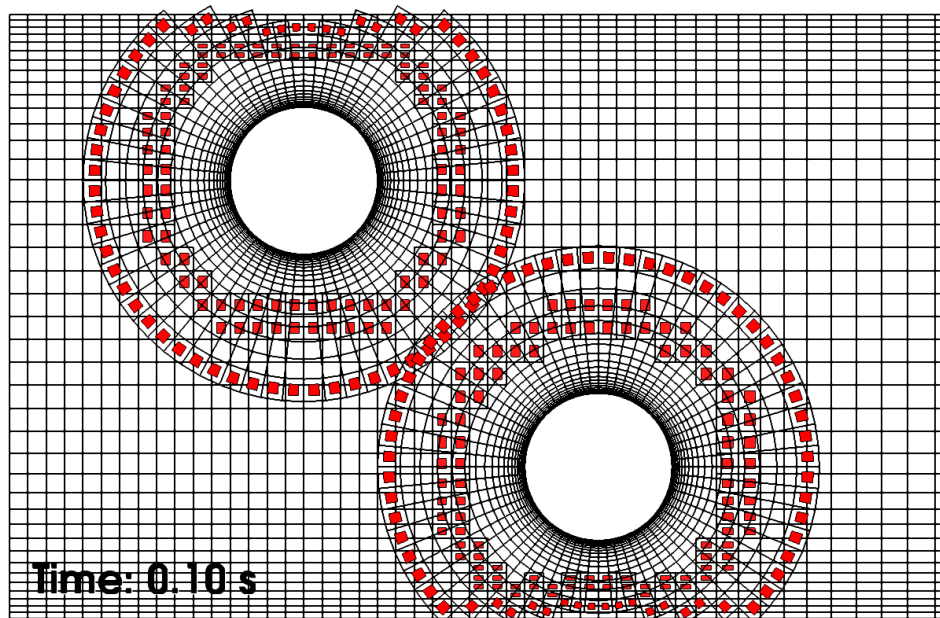
Figure 8: Mass defect of overset grids setup. Red: background mesh, green: foreground mesh.

ACKNOWLEDGEMENTS

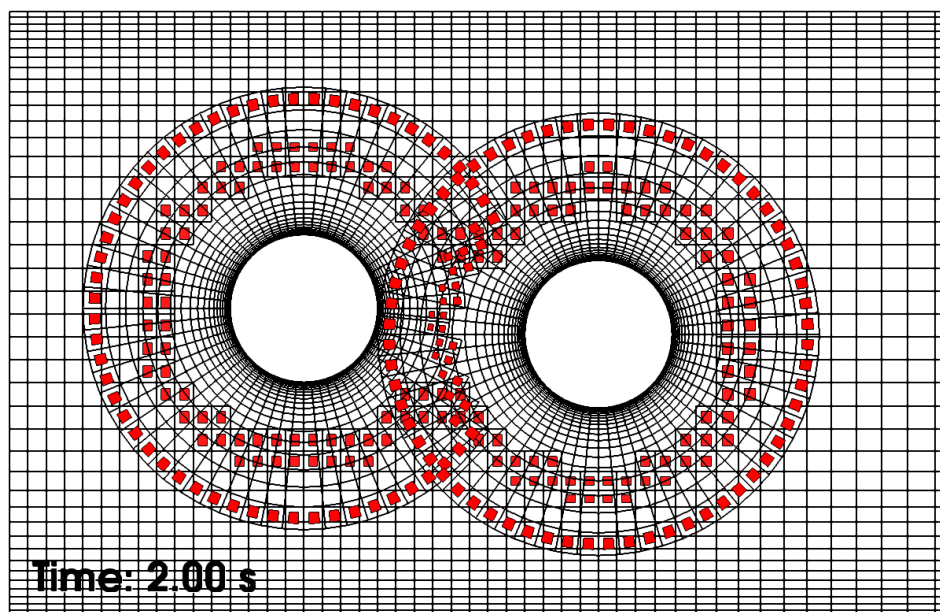
The research presented in this paper has received funding from the European Union Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement n°233869.

5 References

- [Brunswig et al. 2009] BRUNSWIG, J. ; MANZKE, M. ; RUNG, T.: 2D RANS Simulations on Overset Grids. In: *12th Numerical Towing Tank Symposium, Cortona, Italy, 2009*
- [Brunswig et al. 2010] BRUNSWIG, J. ; MANZKE, M. ; RUNG, T.: Explicit and Implicit Coupling Strategies for Overset Grids. In: *10th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology, Moffett Field, California, USA, 2010*
- [Ferziger and Perić 2002] FERZIGER, J.H. ; PERIĆ, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 2002
- [Hadzic 2005] HADZIC, H.: *Development and Application of a Finite Volume Method for the Computation of Flows Around Moving Bodies on Unstructured, Overlapping Grids*, Hamburg University of Technology, PhD thesis, 2005



(a) Parts of the foreground grids are blanked by void space around the background mesh.



(b) The right-hand foreground mesh (priority 2) blanks cells of the left-hand foreground mesh (priority 1) and the background mesh.

Figure 9: Cell status of two oscillating cylinders in a channel at different instants in time.

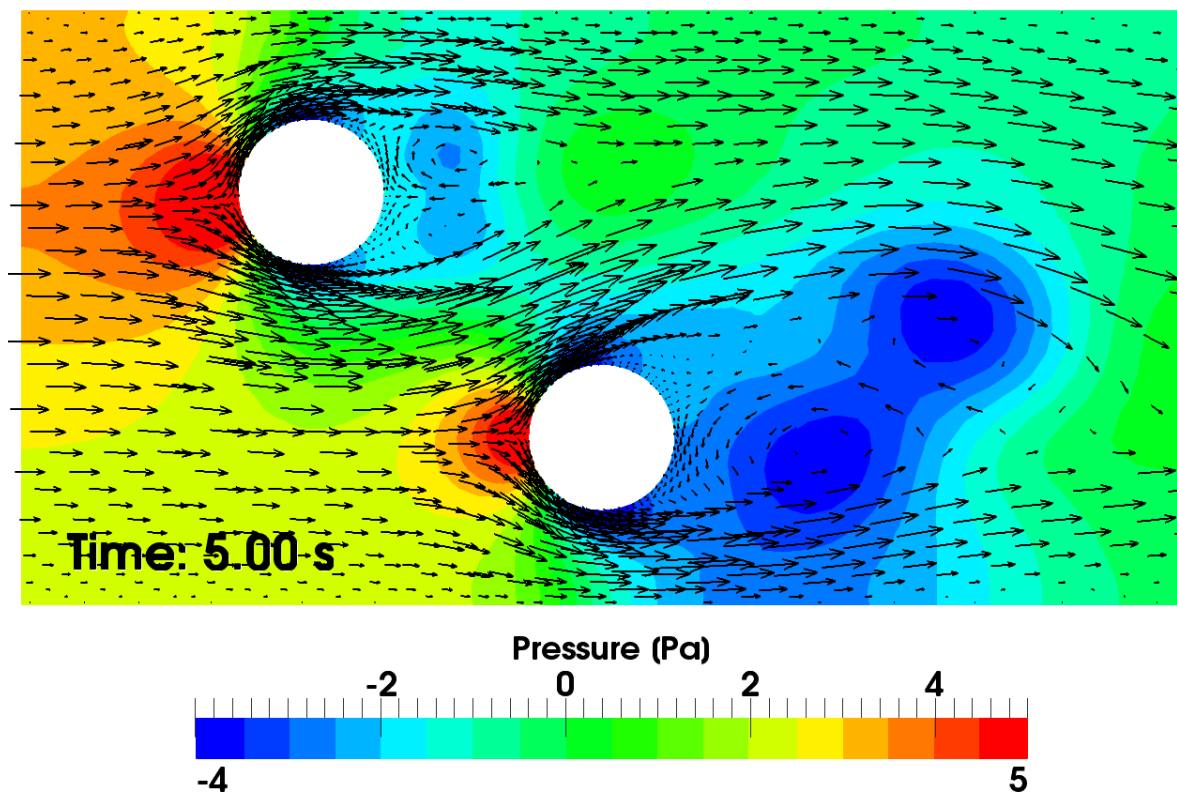


Figure 10: Pressure field and velocity vectors of two oscillating cylinders in a channel.