

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Entwicklung von ingenieurmäßigen, numerischen Lösungen für die Auslegung von Seekästen und Strahlrudern (EINLASS) - Verfahren zur energetisch optimalen Anpassung aller notwendigen Unterwasseröffnungen am Binnenschiff im Rahmen wettbewerbsbedingter Umrüstungen***

der Forschungsstelle(n)

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

Das IGF-Vorhaben 17098 N der Forschungsvereinigung Schiffstechnik wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'R. Kaiser', enclosed in a blue oval.

Duisburg, Datum 22.05.2015

Ort, Datum

Dipl.-Math. Rainer Kaiser

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

AiF – Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen

## **EINLASS**

Entwicklung von ingenieurmäßigen, numerischen Lösungen für die  
Auslegung von Seekästen und Strahlrudern

Bericht 2145 - im Mai 2015

von

Dipl.-Math. R. Kaiser

Dipl.-Ing. J. Höpken

Dipl.-Ing. B. Friedhoff



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modellversuche</b>	<b>4</b>
2.1	Versuchsprogramm . . . . .	4
2.2	Modellbau . . . . .	6
2.3	Untersuchungen am geschlossenen Modell . . . . .	14
2.4	Versuche zu Seekästen . . . . .	19
2.5	Versuche zur Untersuchung von Bugstrahlrudern . . . . .	21
2.6	Particle Image Velocimetry . . . . .	26
2.6.1	Verfahren . . . . .	26
2.6.2	Aufbau . . . . .	29
2.6.3	Ergebnisse . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Numerische Methoden und deren Validierung am Modellversuch</b>	<b>34</b>
3.1	Numerisches Verfahren . . . . .	34
3.1.1	Stationäre Einphasenströmung . . . . .	35
3.1.2	Instationäre Zweiphasenströmung . . . . .	36
3.1.3	Volumenkraftmodell . . . . .	38
3.1.4	Randbedingungen . . . . .	40
3.2	Gittergenerierung . . . . .	42
3.2.1	Gitter für Einphasenströmungen . . . . .	43
3.2.2	Gitter für Zweiphasenströmungen . . . . .	44
3.3	Validierungsfälle . . . . .	46
3.3.1	Simulation des Seekasten-Rezesses . . . . .	46
3.3.2	Validierung anhand der Modellversuche . . . . .	48
3.3.3	Numerische Untersuchung an einem Bugstrahlruder . . . . .	50

<b>4</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>55</b>
4.1	Bugstrahl Impeller . . . . .	55
4.2	Ersatzmodell für Bugstrahlanlagen . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Numerische Simulationen</b>	<b>60</b>
5.1	Seekasten in der Großausführung . . . . .	60
5.1.1	Simulation eines detaillierten Seekastens . . . . .	60
5.1.2	Simulation eines Seekastens asymmetrisch im Schiffsboden . . . . .	65
5.2	Numerische Untersuchungen zu Bugstrahlrudern . . . . .	69
5.2.1	Vergleich der einzelnen Bugstrahlruder aus dem Modellversuch . . . . .	69
5.3	Numerische Untersuchung zur Wirksamkeit eines Bugstrahlruders . . . . .	72
5.3.1	Einfluss unterschiedlicher Positionen der Bugstrahlanlagen . . . . .	74
5.4	Numerische Untersuchung eines als Rezess ausgeführten Bugstrahlruders . . . . .	85
5.5	Anwendung des entwickelten Modells für ein aktives Bugstrahlruder . . . . .	88
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>92</b>
6.1	Bugstrahlruder . . . . .	92
6.2	Seekasten . . . . .	94
6.3	Verwertung der Ergebnisse . . . . .	95
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Gütermotorschiff . . . . .	6
2.2	Geometrie der Bugstrahlanlagen im Modell . . . . .	7
2.3	Bugsektion des Versuchsmodells im Bau . . . . .	8
2.4	Gondeln zur Umlenkung der Strömung . . . . .	9
2.5	Drehbare Gondeln . . . . .	10
2.6	Bugstrahlruder auf Steuerbord eingestellt . . . . .	11
2.7	Vorschiff mit Bugstrahlruder . . . . .	12
2.8	Seekasten als Rezens . . . . .	13
2.9	Seekasten mit geschlossenem Rezens. . . . .	14
2.10	Vergleich des Gesamtwiderstands bei Geradeausfahrt und 8° Drift. . . . .	15
2.11	Wollfäden am geschlossenen Rezens unter Drift. . . . .	16
2.12	Propellerdrehzahlen in den Selbstpropulsionspunkten . . . . .	17
2.13	Strömung am geschlossenen Rezens unter Drift mit Propulsion . . . . .	17
2.14	Strömung am geschlossenen Rezens mit geänderter Drehrichtung . . . . .	18
2.15	Wollfäden am geöffneten Rezens unter Drift. . . . .	19
2.16	Widerstandsversuch mit geschlossenem und offenem Rezens. . . . .	20
2.17	Widerstandsversuch mit geschlossenem und offenem Rezens unter Drift. . . . .	21
2.18	Widerstände ohne/mit geöffnetem Rezens und inaktivem Bugstrahlruder. . . . .	22
2.20	Pfahlzugkräfte mit unterschiedlicher Abstrahlrichtung . . . . .	24
2.21	Querkräfte bei aktivem Bugstrahlruder mit Voraugeschwindigkeit. . . . .	25
2.22	Widerstand bei aktivem Bugstrahlruder mit Voraugeschwindigkeit. . . . .	26
2.23	Exemplarische Partikelbilder und das dazugehörige Vektorfeld. . . . .	27
2.24	Mit Fluoreszenzlack beschichtetes Modell in Tageslicht und im Lichtschnitt. . . . .	29
2.25	Anordnung der PIV-Kameras im Fototunnel. . . . .	30
2.26	Vektorfelder bei laufender Bugstrahlanlage im Ansaug- und Austrittsbereich. . . . .	32
2.27	Strahlausbreitung am seitlichen Austritt. . . . .	33

3.1	Flussdiagramm des SIMPLE-Verfahrens. . . . .	36
3.2	Flussdiagramm des PIMPLE Verfahrens. . . . .	38
3.3	2D-Skizze des Rechengebietes für Simulationen mit einer Phase. . . . .	40
3.4	2D-Skizze des Rechengebietes für Simulationen mit zwei Phasen. . . . .	42
3.5	Verfeinerungszone um die Bugstrahlanlage beim feinen Gitter. . . . .	43
3.6	Auslenkung der freien Oberfläche bei $v_M = 0,972$ m/s . . . . .	45
3.7	Oberflächengitter in der Simulation im Bereich des Rezesses. . . . .	46
3.8	Einfluss des seitlichen Rezesses . . . . .	47
3.9	Geschwindigkeitsverteilung an der seitlichen Seekastenöffnung . . . . .	48
3.10	Einfluss des Rezesses am Boden . . . . .	48
3.11	Vergleich der simulierten Widerstände mit den Modellversuchen. . . . .	49
3.12	Geometrie der Bugstrahlanlagen. . . . .	51
3.13	Volumengitter des Volumenkraftmodells . . . . .	52
3.14	Isoflächen der Geschwindigkeit im Austrittskanal des Bugstrahlruders. . . . .	52
3.15	Isoflächen der Geschwindigkeit in Richtung des Austrittskanals . . . . .	53
3.16	Seitenkraft im Pfahlzug. . . . .	54
4.1	Klassendiagramm fvOptions . . . . .	56
4.2	Nachträglich selektierte Ränder für den Auslasskanal. . . . .	57
4.3	Nachträglich selektierte Ränder für den Ein- und Auslass. . . . .	58
4.4	Ausschnitt aus der Datei für die Randbedingungen der Geschwindigkeit . . . . .	59
5.1	Seekasten mit Grätting . . . . .	61
5.2	Oberflächengitter des Seekastens mit Grätting . . . . .	62
5.3	Isokonturen des Druckes im Bereich des Seekastens . . . . .	63
5.4	Quergeschwindigkeit am seitlichen Grätting . . . . .	63
5.5	Vertikale Geschwindigkeit am Grätting am Schiffsboden . . . . .	64
5.6	Stromlinien im Seekasten 1 . . . . .	64
5.7	Stromlinien im Seekasten 2 . . . . .	65
5.8	Stromlinien im Seekasten 3 . . . . .	65
5.9	Position und Geometrie eines asymmetrischen Seekastens im Hinterschiff . . . . .	66
5.10	Isoflächen des Druckes auf dem Rumpf unter Drift . . . . .	67
5.11	Geschwindigkeitskomponenten von $U$ in Kanalkoordinaten: $U_z$ . . . . .	67
5.12	Geschwindigkeitsvektoren auf Schnittebenen im Seekasten . . . . .	68

5.13	Geschwindigkeitsvektoren auf Schnittebenen im Seekasten . . . . .	68
5.14	Stromlinien im Seekasten . . . . .	69
5.15	Geometrie der Bugstrahlruder mit Oberflächengitter. . . . .	70
5.16	Druckverteilung auf Bugsektion mit Bugstrahlruder hinter dem Vorpiekschott	70
5.17	Druckverteilung auf Bugsektion mit Bugstrahlruder vor dem Laderaum . .	71
5.18	Widerstandsunterschied bei unterschiedlicher Bugstrahlruderposition . . . .	71
5.19	Seitenkraft im Pfahlzug. . . . .	73
5.20	Seitenkraft im Pfahlzug. . . . .	73
5.21	Bugsektion des komplett geschlossenen Modells. . . . .	74
5.22	Tankvariante Bugstrahler nach backbord und achtern geöffnet . . . . .	75
5.23	Variante 2 - Bugstrahler nach backbord geöffnet. . . . .	76
5.24	Variante 3 - Bugstrahler nach backbord geöffnet . . . . .	76
5.25	Variante 4 - Bugstrahler nach backbord geöffnet . . . . .	77
5.26	Variante 5 - Bugstrahler nach backbord geöffnet . . . . .	77
5.27	Variante 6 - Bugstrahler nach backbord geöffnet . . . . .	78
5.28	Widerstand Variante 1, Öffnung achtern und backbord . . . . .	79
5.29	Widerstand Variante 4, Öffnung achtern und backbord . . . . .	80
5.30	Widerstand Variante 5, Öffnung achtern und backbord . . . . .	81
5.31	Gesamtwiderstand Öffnung achtern und backbord . . . . .	82
5.32	Gesamtwiderstand Öffnung nach achtern . . . . .	83
5.33	Gesamtwiderstände Öffnung backbord . . . . .	83
5.34	Erzeugte Querkräfte der Varianten 4 und 6 je Bugstrahlruder. . . . .	84
5.35	Detaillierte Geometrie des backbord Bugstrahlruders. . . . .	86
5.36	Als Rezess ausgeführtes backbord Bugstrahlruder. . . . .	86
5.37	Druckverteilung und detaillierte Geometrie des Bugstrahlruders. . . . .	87
5.38	Druckverteilung Bugstrahlruder als Rezess. . . . .	87
5.39	Widerstände des Bugstrahlruders mit detaillierter Geometrie und als Rezess.	88
5.40	Berechnete Querkraft bezogen auf den eingesetzten Impellerschub. . . . .	89
5.41	Berechnete Querkräfte mit VKM und BSRM. . . . .	90
5.42	Verhältnis der vorgegebenen Impellerschübe . . . . .	91

# Tabellenverzeichnis

3.1	Gitterstudie Einphasenmodell . . . . .	44
3.2	Gitterstudie Zweiphasensimulationen . . . . .	45

# 1 Einführung

Binnenschiffe haben vom Tag ihrer Inbetriebnahme an eine sehr lange Dienstzeit. Durchschnittlich wird ein Binnenschiff erst nach etwa 40 Jahren durch einen Neubau ersetzt. Während dieser langen Dienstzeit können sich die wirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen erheblich verändern. Ebenso tritt eine Alterung der technischen Einrichtungen auf. Auf Basis dieser sich ständig ändernden Bedingungen werden gegebenenfalls Modernisierungsmaßnahmen notwendig, welche entweder wirtschaftlich oder durch geänderte Gesetzgebungen motiviert sind. Häufig ist es notwendig, dass im Rahmen von technischen Modernisierungen zusätzliche Öffnungen in den Schiffsrumpf hinzugefügt werden müssen, welche im ursprünglichen Entwurf des Schiffes nicht enthalten sind. Diese Öffnungen beeinflussen die Umströmung des Schiffsrumpfes und haben einen direkten Einfluss sowohl auf den Widerstand des Schiffes als auch auf weitere hydrodynamische Eigenschaften. Der Gesamtwiderstand erhöht sich typischerweise durch das Hinzufügen zusätzlicher Durchdringungen des Rumpfes. Dies hat direkten Einfluss auf den Brennstoffverbrauch und somit die Wirtschaftlichkeit des Schiffes, weshalb der zusätzliche Widerstand möglichst gering gehalten werden soll. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden hierzu schwerpunktmäßig zwei Arten von Rumpfdurchdringungen, die durch Modernisierungen nachträglich hinzugefügt oder verändert werden, untersucht. Zum einen werden die im Zuge eines Tauschs der Hauptmaschine zu modifizierenden Seekästen betrachtet und zum anderen der Einbau von zusätzlichen oder neuen Bugstrahlanlagen. Sämtliche Untersuchungsergebnisse können selbstverständlich auch für den Entwurf von Neubauten genutzt werden und so zu einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz des Transportsystems Binnenschiff beitragen.

Langfristig steigen die Kraftstoffpreise deutlich, weshalb die Reduzierung des Verbrauchs direkt die Wettbewerbsfähigkeit des jeweiligen Binnenschiffes verbessert. Eine Reduzierung des Verbrauchs kann, vor allem bei älteren Binnenschiffen, durch Einbau einer neuen Hauptmaschine erreicht werden. Dies kann zum Einen durch das Ersetzen des gesamten

Hinterschiffes erfolgen. Diese Art der Modernisierung bringt zum Einen das Hinterschiff hydrodynamisch und zum Anderen die Schiffsmaschinenanlage auf den aktuellen Stand der Technik. Durch den hohen baulichen Aufwand sind hierzu jedoch hohe Investitionen erforderlich, die wirtschaftlich nicht immer vertretbar sind, wenngleich diese aus technischer Sicht sinnvoll sind. Die andere Art der Modernisierung ist daher der Ersatz der Hauptmaschine ohne Veränderung des Hinterschiffes, was eine kostengünstigere Variante der Modernisierung darstellt. Diese Verbindung von moderner Technik und unverändertem und möglicherweise Jahrzehnte altem Hinterschiff birgt jedoch auch Risiken. Die Kühlung der Hauptmaschine erfolgt unter anderem über durchströmte Öffnungen im Bereich des Hinterschiffes, so genannte Seekästen. Werden Änderungen an den Seekästen im Rahmen der Modernisierung durchgeführt, so ist es vorgekommen, dass eine ausreichende Kühlung der Hauptmaschine nicht mehr unter allen auftretenden Betriebsbedingungen gewährleistet war. Dies ist unter anderem auf eine ungenügende Durchströmung der Seekästen unter gewissen Bedingungen zurückzuführen. Aufgrund dieser Unwägbarkeiten, werden solche bedeutsamen Investitionen der Schiffseigner in die Flotte nur sehr zögerlich getätigt. Dieses Forschungsprojekt soll dazu beitragen, die Erfolgsaussichten solcher Modernisierungsmaßnahmen zu erhöhen, indem mögliche negative Effekte vorher abgeschätzt werden können.

Um die Wettbewerbsfähigkeit von Binnenschiffen weiter zu erhöhen, kann das befahrbare Fahrtgebiet durch den Einbau von Bugstrahlanlagen erweitert werden. Kleinere Wasserstraßen haben in der Regel die Restriktion, dass diese nur von Schiffen mit Bugstrahlanlagen befahren werden dürfen. Neben den hierdurch hinzugefügten positiven Aspekten, wie der erhöhten Manövrierbarkeit und Betriebssicherheit, schlagen sich Bugstrahlruder auch negativ, durch einen erhöhten Schiffswiderstand, im Brennstoffverbrauch nieder. Diese Art der Modernisierungsmaßnahmen ist ein weiterer Aspekt, der in diesem Forschungsprojekt untersucht wurde. Der Einfluss der Öffnungen der Bugstrahlanlagen auf den Schiffswiderstand ist recht groß und kann, je nach Anordnung der Anlagen, zu Widerstandserhöhungen bis ca. 10% führen. Dieser signifikante Anstieg des Widerstandes ist auf die Lage der Auslässe zurückzuführen, da diese teilweise im direkt angeströmten Bereich liegen. Dies hat eine Erhöhung der Betriebskosten zur Folge. Dennoch kann diese Investition wirtschaftlich sinnvoll sein, da ein Bugstrahlruder auch wirtschaftliche Vorteile bringt. Es ist also eine Minimierung des Zusatzwiderstands durch die Bugstrahlanlagen anzustreben. Außer der Minimierung des zusätzlichen Widerstands ist die Wirksamkeit des Bugstrahlruders wichtig. Neben der Wirksamkeit bei sehr kleinen Vorausgeschwindigkeiten, z.B. bei Anle-

gemanövern, ist die Größe der erzeugten Seitenkraft bei Vorausgeschwindigkeiten wichtig. Diese Seitenkraft trägt entscheidend zum Manövrierverhalten bei.

Zur Untersuchung des Einflusses von nachträglich eingebauten Seekästen und Bugstrahlrudern auf den Schiffswiderstand und andere hydrodynamische Aspekte wurden Modellversuche im großen Flachwassertank des DST durchgeführt. In Widerstands-, Propulsions- und so genannten Pfahlzugversuchen wurden verschiedene Anordnungen verglichen und die integralen Kraftwirkungen gemessen. Parallel zu diesen Versuchen wurde auch das Strömungsfeld mit dem laserbasierten Verfahren der so genannten Stereo Particle Image Velocimetry aufgemessen. Durch dieses Verfahren ist es möglich, ein Geschwindigkeitsfeld in einer Ebene mit allen drei räumlichen Komponenten zu erfassen.

Ausgewählte Konfigurationen aus den Modellversuchen wurden unter identischen geometrischen und kinematischen Bedingungen numerisch modelliert und simuliert. Hierbei wurde das lizenzfreie Softwarepaket OpenFOAM eingesetzt. Der direkte Vergleich der gemessenen und simulierten Kenngrößen erlaubte eine Anpassung verschiedener Berechnungsparameter und damit eine verbesserte Qualität der numerischen Simulationen. Mit den so validierten Methoden wurden verschiedene Ansätze zur vereinfachten Modellierung der aktiven und passiven Einbauten auf ihre Eignung zur Reduktion des Aufwands bei Geometrieerstellung, Vernetzung und Rechenzeit bei gleichzeitiger Gewährleistung der Qualität der Ergebnisse geprüft. Anschließend folgten Serienrechnungen, bei denen weitere Parameter variiert wurden. Sowohl für die Seekästen als auch für die Bugstrahlanlagen wurden allgemeine Zusammenhänge gesucht, die eine Übertragung auf möglichst vielfältige Umbauprojekte zulassen.

## 2 Modellversuche

Die umfangreichen Modellversuche zur Validierung der numerischen Verfahren und zur Untersuchung einiger Teilaspekte der hier behandelten Strömungsvorgänge an Rumpföffnungen wurden im großen Flachwassertank des DST durchgeführt. Da der Modellbau und die Ausrüstung mit den verschiedenen Aktuatoren und Sensoren sehr aufwändig ist, wurde für ein Gütermotorschiff (GMS) im Maßstab 1:16 ein modulares Modell gefertigt. Im Rahmen der Modellversuche wurden die beiden Bugstrahlanlagen des GMS und die Seekästen in verschiedenen Kombinationen untersucht. Lediglich Variationen der Positionierungen der einzelnen Anlagen konnten so nicht berücksichtigt werden.

### 2.1 Versuchsprogramm

Strömungsmechanische Versuche mit freier Oberfläche zwischen zwei Fluiden müssten streng genommen sowohl die Reynold'sche als auch die Froude'sche Ähnlichkeit erfüllen, was physikalisch mit skalierten Modellen und verfügbaren Fluiden nicht möglich ist. Daher ist es ein etabliertes Verfahren, die Froude'sche Ähnlichkeit einzuhalten und die eingeführten Fehler durch die Verletzung der Reynold'schen Ähnlichkeit nachträglich zu korrigieren. Die Froude'sche Ähnlichkeit basiert auf der Annahme, dass geometrisch ähnliche Körper ein geometrisch ähnliches Wellenbild generieren. Jedoch müssen die viskosen Kräfte gesondert auf die Großausführung extrapoliert werden, da die Reynold'sche Ähnlichkeit nicht eingehalten werden kann. Es wurden in der Vergangenheit spezielle Extrapolationsverfahren entwickelt, die diese Maßstabeffekte berücksichtigen. Die Geschwindigkeit im Modellversuch entspricht der Geschwindigkeit der Großausführung  $v_S$  dividiert durch die Wurzel des Maßstabsfaktors  $\lambda$ . Dies ist für die durchzuführenden Modellversuche  $\sqrt{\lambda} = 4$ .

Das Versuchsprogramm wurde in drei Versuchsreihen gestaffelt:

1. Versuche ohne zusätzliche Öffnungen am Modell (Kapitel 2.3),
2. Versuche mit zusätzliche Öffnungen für einen Seekasten (Kapitel 2.4),
3. Versuche mit zusätzlichen Öffnungen durch Einbau von Bugstrahlrudern (Kapitel 2.5).

Für das geschlossene Modell (1.) wurden zu Vergleichszwecken Widerstands-, Propulsions- und Driftversuche durchgeführt, die später zur Validierung der numerischen Methoden verwendet wurden. Diese Untersuchungen wurden bei verschiedenen Modellgeschwindigkeiten unternommen. Die Modellversuche zur Untersuchung des Einflusses der Seekästen (2.) auf die Umströmung des Schiffsrumpfes beinhalteten ebenfalls Widerstands-, Propulsions- und Driftversuche bei verschiedenen Voraugeschwindigkeiten. Zusätzlich wurden hier Pfahlzugversuche mit rechts- und linksdrehendem Propeller am Propulsor des Hauptantriebs durchgeführt. Des Weiteren erfolgten PIV-Versuche (Particle Image Velocimetry) zur detaillierten Visualisierung der Strömung im Bereich des Seekastens. Die Untersuchung des Einflusses von Bugstrahlrudern (3.) erfolgte durch Widerstandsversuche mit entsprechenden Öffnungen für die Bugstrahlanlage. Des Weiteren wurden Pfahlzugversuche für die beiden Propulsoren der Bugstrahlruder durchgeführt. Ergänzt wurden die Versuche durch Versuche bei Vorauffahrt mit aktiven Bugstrahlrudern. Ebenso erfolgten auch für die Bugstrahlruder PIV-Messungen der Strömung im Bereich der zusätzlichen Öffnungen.

Für diese Referenzversuche wurde eine Wassertiefe im Tank von  $h = 0,25$  m eingestellt und das Modell auf einen Tiefgang von  $T = 0,125$  m abgeladen, was einem Verhältnis von  $\frac{h}{T} = 2$  entspricht. In der Großausführung wäre der Kanal 4 m tief und der Tiefgang des Schiffes würde 2 m betragen. Da erst bei extrem geringem Flottwasser eine Beeinflussung der schiffstechnischen Wirksamkeit der Bugstrahlanlagen stattfindet und die Wirkung auf die Wasserstraße nicht Gegenstand dieses Vorhabens war, repräsentiert diese Konfiguration die in der Großausführung auftretenden Bedingungen hinreichend.

## 2.2 Modellbau

Das gewählte GMS hat für diesen Schiffstyp repräsentative Abmessungen: eine Länge von 110 m, eine Breite von 11,45 m und einen Tiefgang von bis zu 3 m. Abbildung 2.1 zeigt das gewählte GMS in einer Seitenansicht sowie schräg von vorne und schräg von hinten.

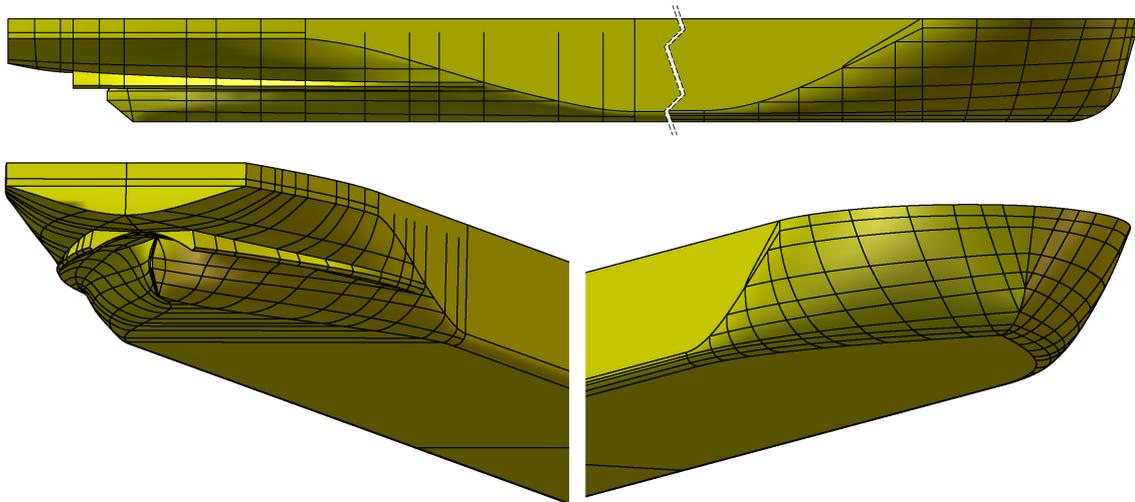


Abb. 2.1: 3D-Ansichten des im Modellmaßstab untersuchten Gütermotorschiffes. Seitenansicht (oben), Heck (unten links) und Bug (unten rechts).

In der Praxis sind die Bugstrahlruder häufig als Vierkanalbugstrahlruder ausgeführt. Bei dieser Art der konstruktiven Ausgestaltung der Bugstrahlanlagen ist es möglich, die Wirkrichtung der Bugstrahlanlagen in vier Raumrichtungen und nicht nur in zwei einzustellen. Dies hat unter anderem den Vorteil, dass so Stoppmanöver durch den Einsatz der Bugstrahlanlagen unterstützt werden können. Ebenso werden oft zwei Bugstrahlruder eingebaut, um regulatorisch-bedingte Anforderungen an die Redundanz zu erfüllen. Zusätzlich können so Strecken auch dann befahren werden, wenn eine Anlage ausfällt. Aus diesem Grund und zur Untersuchung der Wirksamkeit des Bugstrahlruders wurden in das Modell zwei Vierkanalbugstrahlruder eingebaut. Die verwendete Geometrie, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, basiert auf einer Zeichnung einer Doppel-Anlage, welche die Firma Verhaar Omega zur Verfügung gestellt hat.

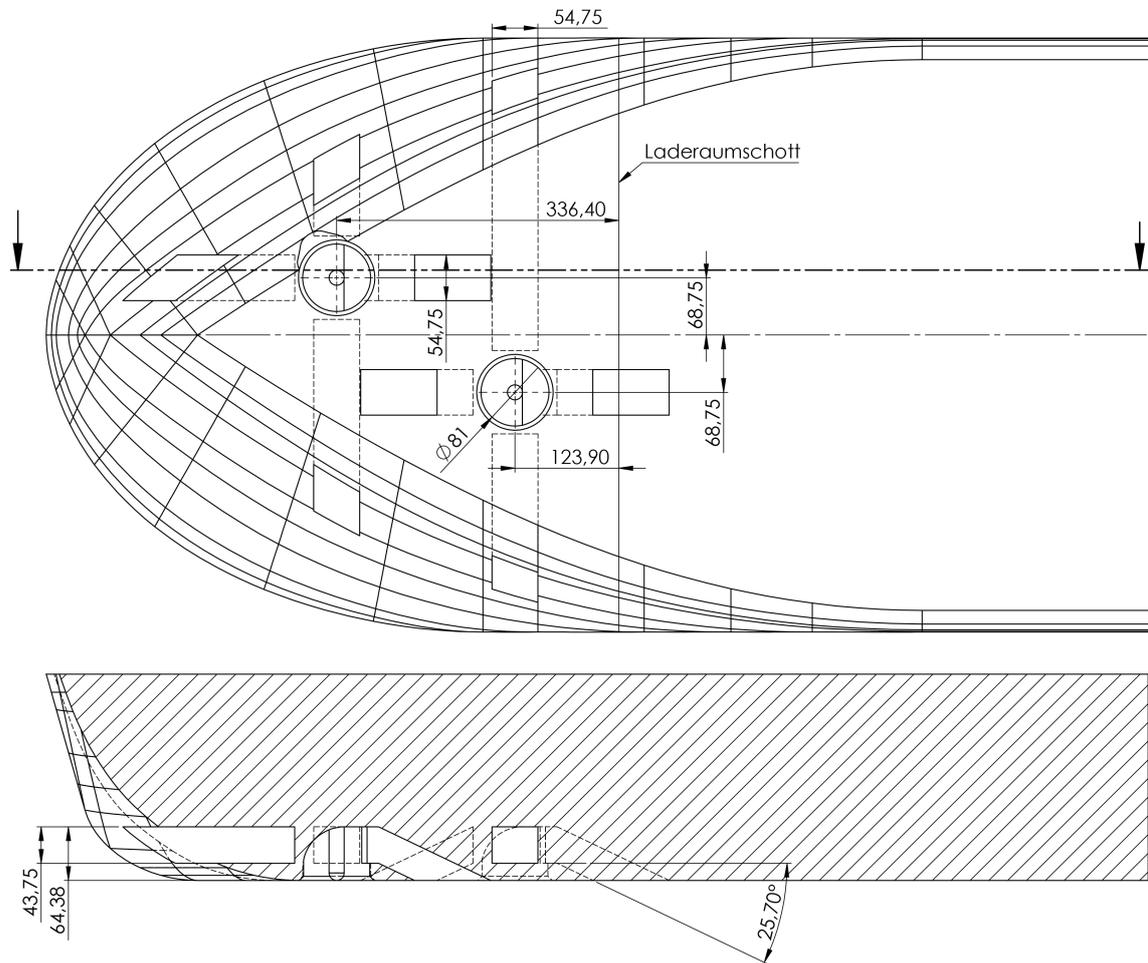


Abb. 2.2: Geometrie der Bugstrahlanlagen im Modellversuch.

Die Geometrie der Kanäle der Bugstrahlanlage ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Das vordere Bugstrahlruder ist außermittig mit einem horizontalen Stichkanal nach vorne versehen. Die Längsposition ist so gewählt, dass die Anlage direkt hinter dem Vorpiekschott liegt, was auch die maximal mögliche bzw. regulatorisch erlaubte Längsposition ist. Das hintere Bugstrahlruder liegt direkt vor dem Laderaum, weswegen der hintere Abstrahlkanal halb unter dem Laderaum entlang geführt werden muss. Dies entspricht damit der minimal möglichen Längsposition. Entsprechend sind beide Anlagen an den jeweils maximal realisierbaren Längspositionen eingebaut.



Abb. 2.3: Dieses Foto zeigt den Bug des Modells während des Baus. Die modulare Bauweise erlaubt die Integration von Sensoren und das Öffnen und Verschließen der einzelnen Kanäle.

Wie bei Vierkanalanlagen üblich, wird die Schubrichtung durch drehbare Gondeln gesteuert. Diese Gondeln sind im vertikalen Teil des Kanals angeordnet und umschließen den Impeller. Durch eine Öffnung in der Mantelfläche kann das durch eine Öffnung im Schiffsboden angesaugte Fluid in die gewünschte Richtung umgelenkt werden.

Für den Modellversuch sind diese drehbaren Gondeln aus Messing gefertigt worden. Diese Gondeln samt Öffnungen sind in Abbildung 2.4 abgebildet. Die linke Gondel zeigt die Öffnung in der Mantelfläche, die zum Umlenken der Strömung in Schubrichtung vorgesehen ist. Die vier Schrauben am oben liegenden Flansch werden zum Fixieren der Verstellrichtung verwendet. Diese Verstellrichtung ist notwendig, um die Schubrichtung während der Modellversuche entsprechend der gewünschten Werte einstellen zu können. Die rechte Gondel zeigt hingegen die Ansicht von unten. Durch die kleine Öffnung wird die Impellerwelle geführt und die große schwarze Fläche ist als Halbkugel ausgestaltet, um das Fluid ohne große Stoßverluste in Schubrichtung um  $90^\circ$  umlenken zu können.

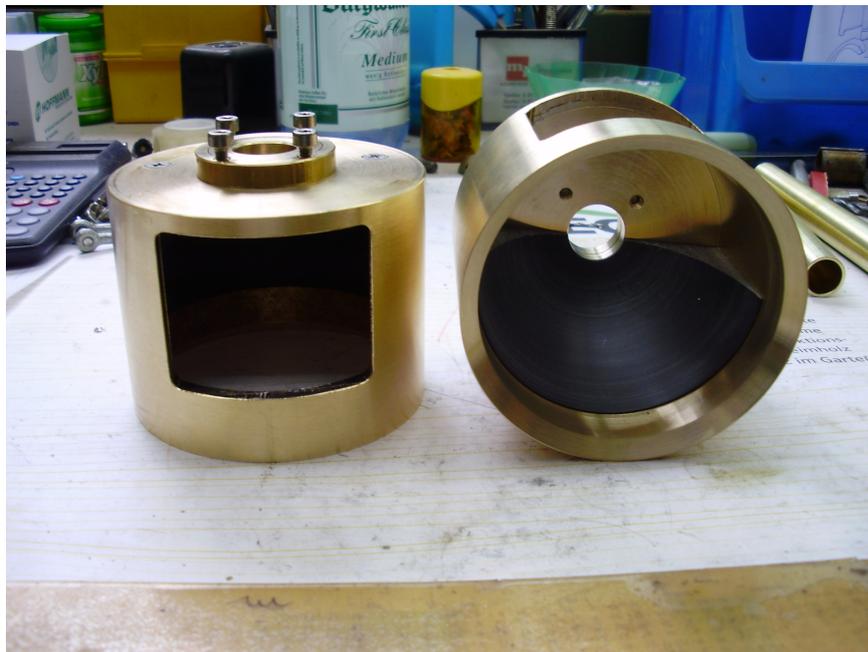


Abb. 2.4: Aus Messing gefertigte Gondeln mit Füllstücken aus Kunststoff zur Umlenkung der Strömung, gezeigt von der Seite (links) und von unten (rechts).

Der Modellbau für die Bugstrahlruder gestaltete sich als sehr aufwendig, was nicht zuletzt auf die feinmechanischen Anforderungen zurückzuführen ist. Das Fertigen der halbkugelförmigen Ausfräsungen innerhalb der Gondeln sowie die Anzahl der anzubringenden Fasen und Gewinde, insbesondere in dem notwendigen Maßstab, gestalteten sich als sehr zeitintensiv.

Abbildung 2.5 zeigt das gebaute Modell während der Ausrüstung mit den Bugstrahlanlagen fotografiert vom Bug zum Heck. Unter den beiden grauen Scheiben befindet sich jeweils eine Bugstrahlanlage, deren Wirkrichtungen über die beiden Arme um  $360^\circ$  verstellt werden können. Die Durchdringungen des Modellkörpers wurden mit grauer Modelliermasse abgedichtet. Die transparenten Schläuche wurden in die acht Kanäle der beiden Bugstrahlanlagen eingebaut, um lokale Druckmessungen zu ermöglichen. Die Durchdringungen wurden ebenfalls abgedichtet.

In Abbildung 2.6 ist der Steuerbordkanal der vorderen Anlage dargestellt. Hier ist die Gondel so gedreht, dass der Schub in Richtung Steuerbord umgelenkt werden würde. Der Impeller fehlt in diesem Bild, da er zu diesem Zeitpunkt noch nicht eingebaut wurde. Er würde am unteren Ende der Messingwelle sitzen. Gut zu erkennen ist die leicht verrundete Hinterkante

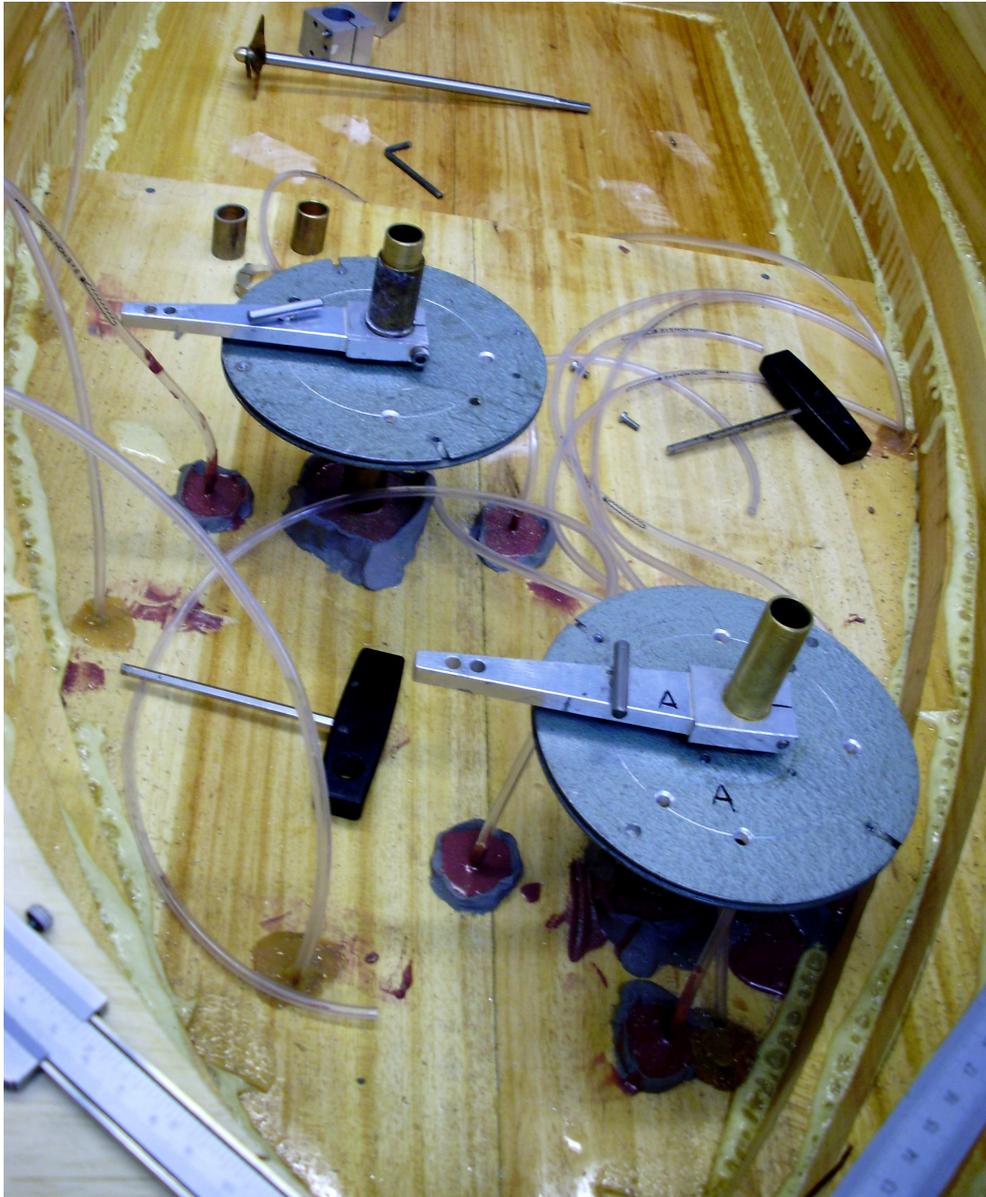


Abb. 2.5: Blick in das Modell während der Ausrüstung. Gut zu erkennen sind die Vorrichtungen zur Wahl der Abstrahlrichtung der Gondeln sowie die Schläuche zur Messung der Drücke in den Kanälen.



Abb. 2.6: Einblick in einen Bugstrahlruderkanal, ausgerichtet nach Steuerbord.

des Kanals. Dies hat den Hintergrund, dass hierdurch Druckspitzen bei der Umströmung dieser Kante durch die Vorausgeschwindigkeit des Modells gemindert werden, was sich positiv im Widerstand niederschlägt.

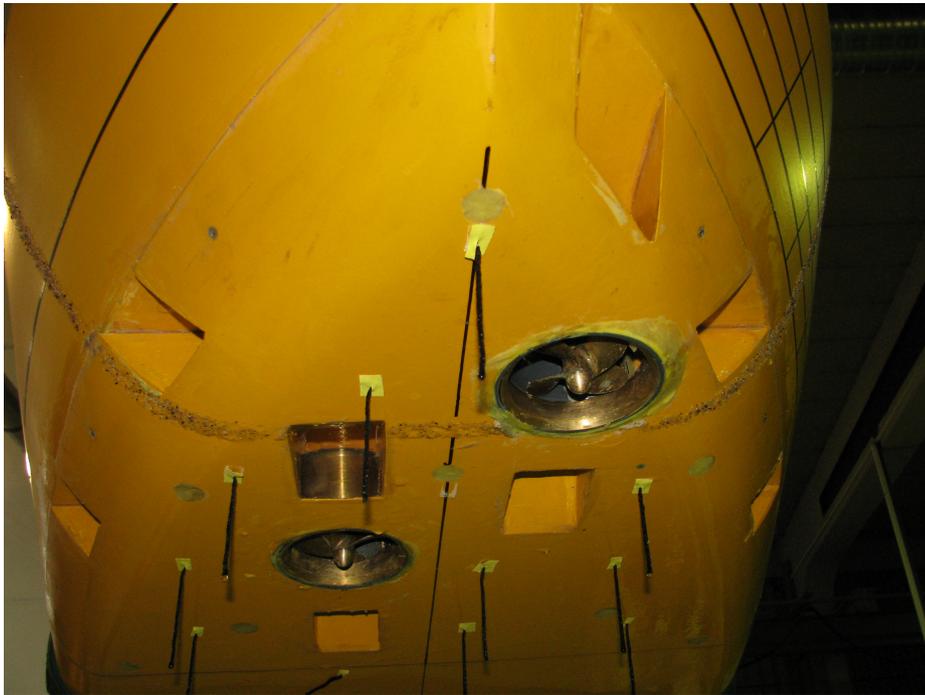


Abb. 2.7: Vorschiff vollständig ausgerüstet mit den Bugstrahlanlagen einschließlich der Impeller.

Das für die Modellversuche komplett ausgerüstete Vorschiff ist in Abbildung 2.7 von schräg unten dargestellt. Gut zu erkennen sind die beiden Impeller, die in den Gondeln eingebaut sind. Die Gondel der hinteren Anlage ist durch den vorderen Kanal zu sehen. Es wurden Sandstreifen zur Turbulenzerzeugung auf dem Vorschiff angebracht. Um die lokale wandnahe Strömung visualisieren zu können, wurden zusätzlich Wollfäden auf den Schiffsboden aufgeklebt, die bei der Fahrt über den Fototunnel mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen werden. Mittels dieser Bilder kann im Anschluss die lokale Umströmung begutachtet werden.

Aufgrund der Krümmung des Vorschiffes, musste der Spalt zwischen der Gondel der vorderen Bugstrahlanlage und dem Rumpf mit Modelliermasse verschlossen und gestrakt werden. Diese Anpassung wurde auch in den numerischen Simulationen berücksichtigt. Um den durch die hinzugefügten Rumpfoffnungen der Bugstrahlanlagen und Seekästen generierten Zusatzwiderstand quantifizieren zu können, wurden alle Öffnungen vor Beginn der ersten Versuchsreihe mit geeigneten Formteilen und Modelliermasse verschlossen. Die Kunststoffblöcke und die wachsartige Masse sind später relativ leicht wieder zu entfernen, wenn die einzelnen Öffnungen wieder geöffnet werden sollen.



Abb. 2.8: Seekästen als Rezess ausgeführt.

Seekästen befinden sich meist am Ende des parallelen Mittelschiffes und im Bereich des Tunneleintritts am Heck. Im Modell wurde ein Seekästen als Rezess, also einer Vertiefung im Rumpf, auf der Backbordseite ausgeführt. Die Steuerbordseite blieb weiterhin geschlossen. Die bauliche Ausführung des Rezesses ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Zu sehen sind ebenfalls eine mittige Öffnung pro Rezess, die zum Messen des Druckes vorgesehen ist. Damit auch Versuche mit geschlossenem Modell möglich sind, wurde der Rezess vor Beginn der ersten Versuchsreihe verschlossen, wie in Abbildung 2.9 zu sehen. Wie im Bereich des Vorschiffes und der Bugstrahlanlagen wurden am Ende des parallelen Mittelschiffes Wollfäden zur Visualisierung der wandnahen Strömung angebracht.

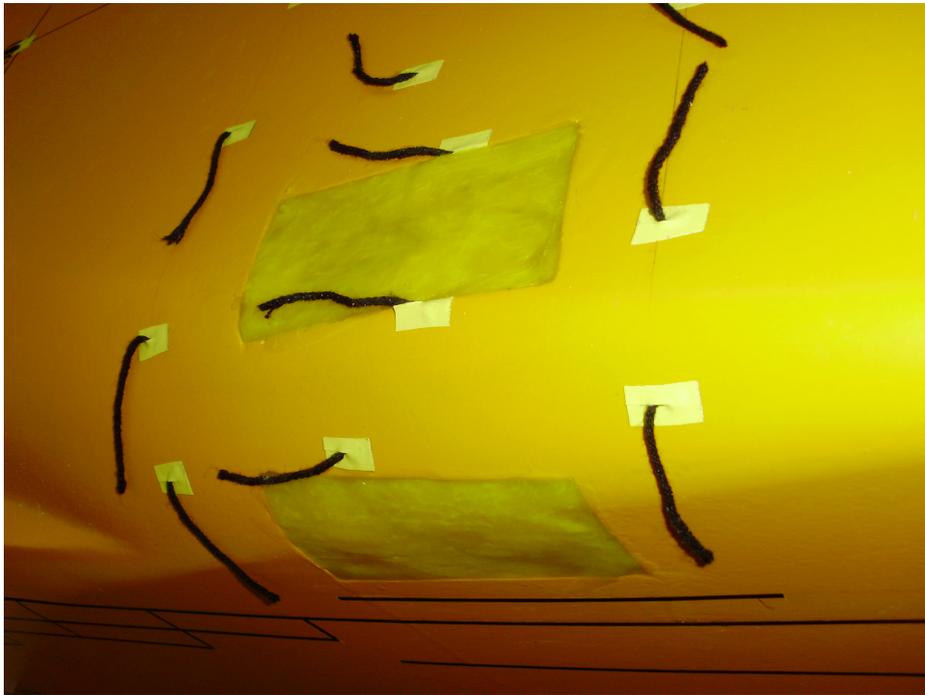


Abb. 2.9: Mit Modelliermasse verschlossener Rezzess.

### 2.3 Untersuchungen am geschlossenen Modell

Bei den Untersuchungen am geschlossenen Modell wurden zu den Standard-Kenngrößen, Widerstand, Absenkung und Trimm, zusätzlich Querkräfte gemessen, da diese für die Untersuchungen der Bugstrahlruder wichtig sind. Alle anderen Freiheitsgrade sind durch einen entsprechenden Versuchsaufbau unterbunden. Für diese Versuchsreihe wurden die folgenden Geschwindigkeiten ausgewählt: 0,830 m/s und 0,969 m/s. Diese Modellgeschwindigkeiten entsprechen 12 km/h und 14 km/h in der Großausführung. Die resultierenden Widerstände für diese Geschwindigkeiten sind durch die blaue Linie in Abbildung 2.10 dargestellt.

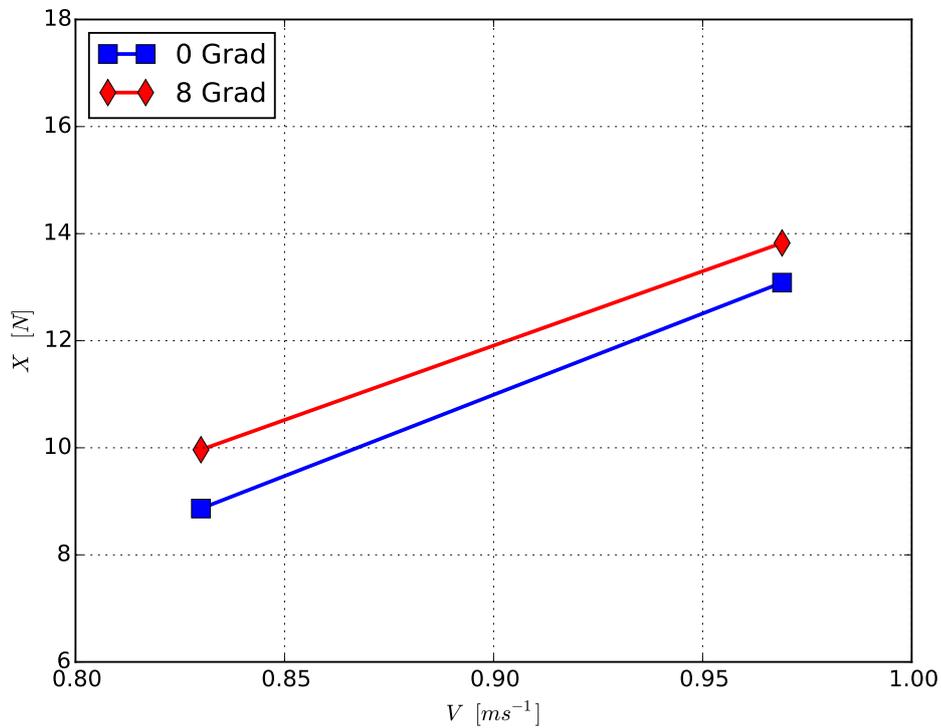


Abb. 2.10: Vergleich des Gesamtwiderstands bei Geradeausfahrt und  $8^\circ$  Drift.

Zusätzlich zu den Geradeausfahrten wurden weiterhin Modellversuche unter Drift durchgeführt. Als Driftwinkel wurde  $8^\circ$  gewählt und ebenfalls bei den genannten Geschwindigkeiten untersucht. Zusätzlich zu den Widerstandskräften wurden auch Driftkräfte ermittelt. Abbildung 2.10 zeigt den Vergleich zwischen Geradeaus- und Driftfahrt. Wie zu erwarten, ist der Widerstand bei Geradeausfahrt geringer als bei Drift.

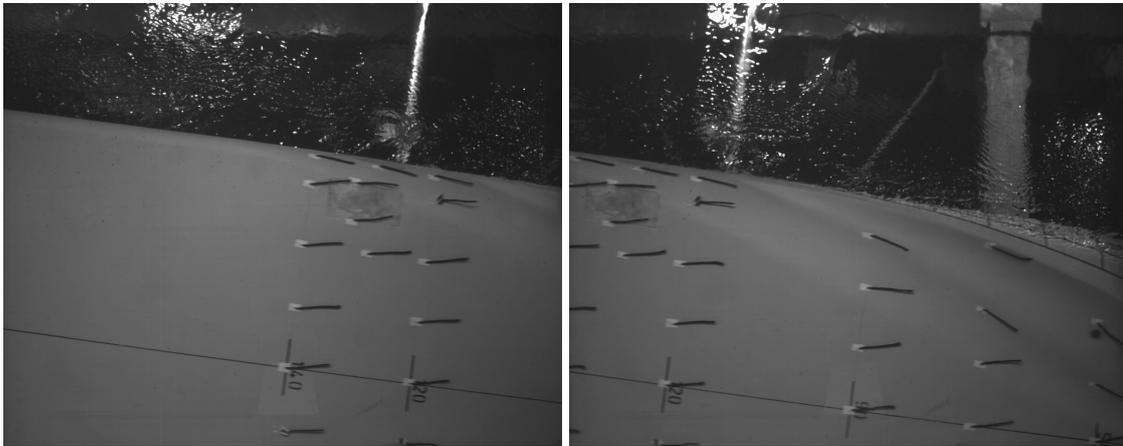


Abb. 2.11: Strömung am geschlossenen Rezzess unter  $8^\circ$  Drift zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten bei 16 km/h in der Großausführung.

Durch eine im Fototunnel angebrachte Hochgeschwindigkeitskamera wurden Videoaufnahmen von der Unterseite des fahrenden Modells aufgenommen. Standbilder zu verschiedenen Zeitpunkten des Videos sind in Abbildung 2.11 zu sehen. Die Lage der einzelnen Fäden ist in beiden Bildern weitgehend identisch. Das heißt, die wandnahe Strömung an den verschlossenen Seekästen ist sehr stabil und die Tunnel werden ebenfalls ohne nennenswerte großskalige Wirbel und Ablösungen durchströmt.

Mit dem komplett geschlossenen Modell wurden ebenfalls Propulsionsversuche durchgeführt. Diese wurden für die Großausführungsgeschwindigkeiten 12, 14 und 16 km/h gemessen. Die jeweiligen Versuchsfahrten wurden nach der englischen Methode durchgeführt. Hierbei werden bei konstanter Geschwindigkeit jeweils mehrere Drehraten eingestellt, aus den zugehörigen Messungen wird anschließend der Selbstpropulsionspunkt des Schiffs, also mit korrigierter Schubbelastung, im Modellmaßstab interpoliert. Bei 12 km/h liegt der Selbstpropulsionspunkt bei  $n = 11,6$  Hz, wohingegen er bei 16 km/h bei 17,3 Hz lag. Eine graphische Darstellung der Drehzahlen in den Selbstpropulsionspunkten bei den verschiedenen Geschwindigkeiten ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Diese unter Geradeausfahrt bestimmten Drehzahlen wurden in den Driftversuchen, unter einem Driftwinkel von  $8^\circ$ , bei den zugehörigen Geschwindigkeiten eingestellt. Damit entspricht diese Drehzahl nicht dem Selbstpropulsionspunkt unter Drift, aber die Wirkung des Propellers ist vergleichbar.

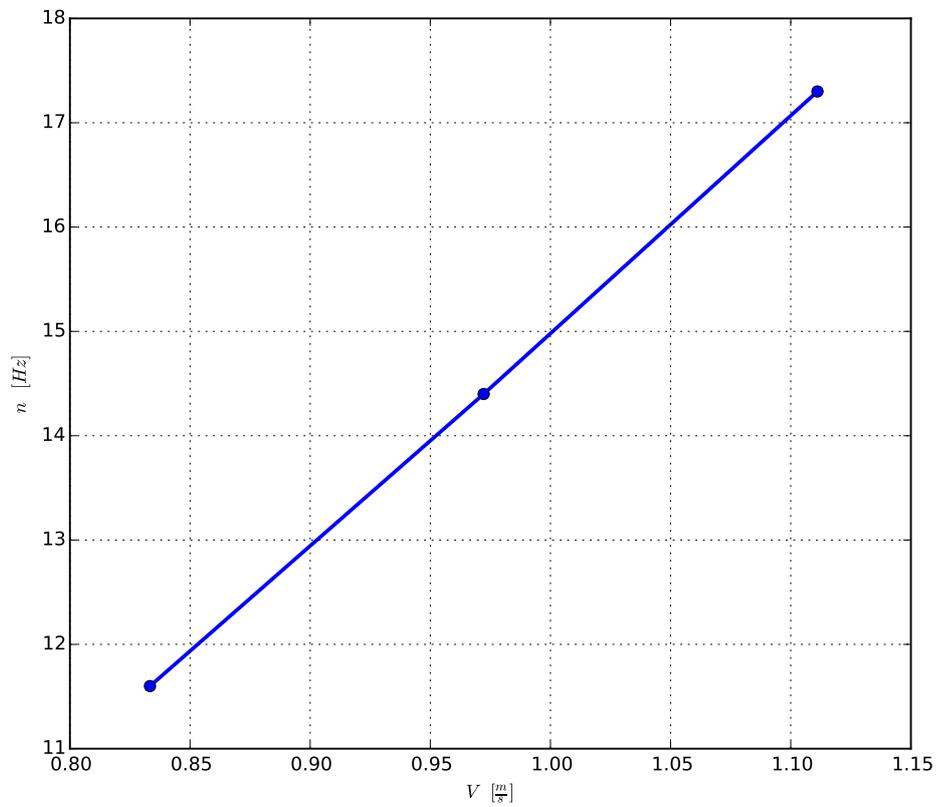


Abb. 2.12: Propellerdrehzahlen in den Selbstpropulsionspunkten bei den jeweiligen Geschwindigkeiten.

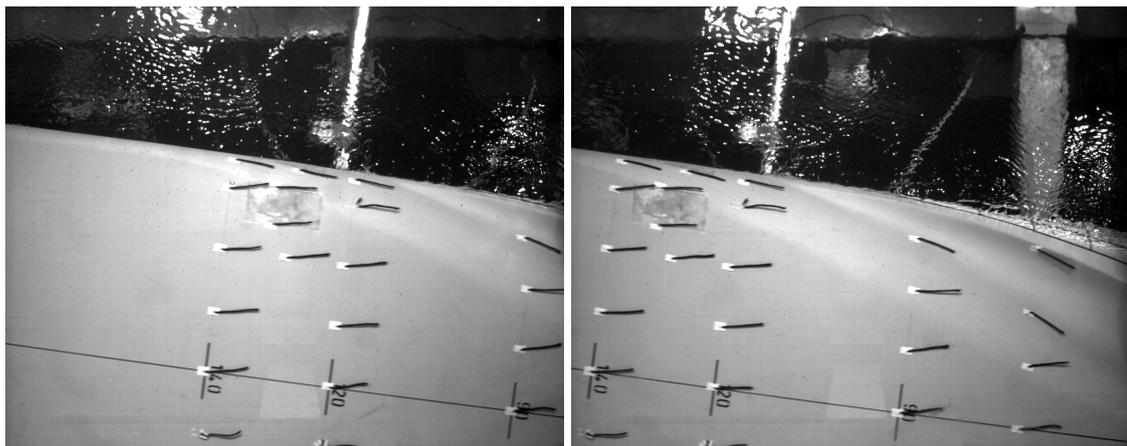


Abb. 2.13: Strömung am geschlossenen Rezzess unter  $8^\circ$  Drift zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten bei 12 km/h in der Großausführung mit aktiver Propulsion.

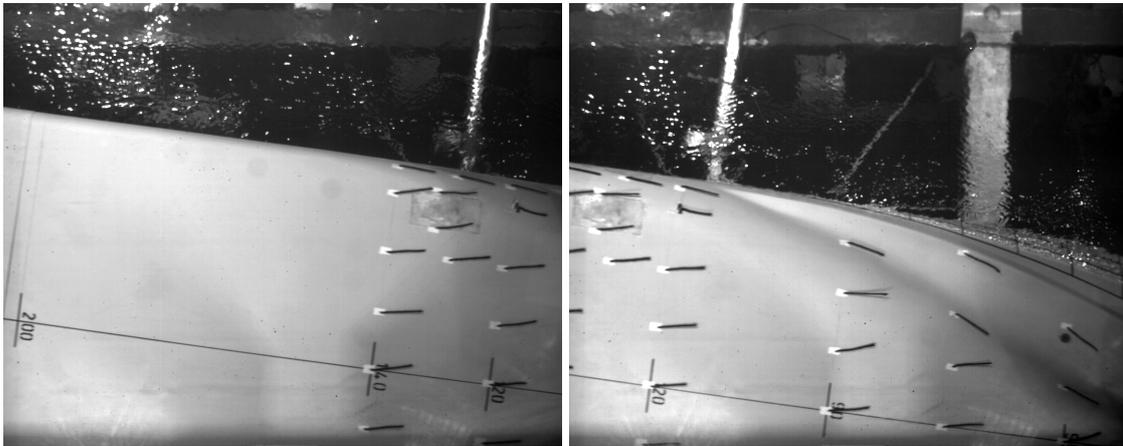


Abb. 2.14: Strömung am geschlossenen Rezzess zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten bei 12 km/h in der Großausführung mit aktiver Propulsion und geänderter Drehrichtung.

In Abbildung 2.13 wird die Umströmung des geschlossenen Rezzesses zu unterschiedlichen Positionen über dem Fototunnel dargestellt. Im Gegensatz zu den in Abbildung 2.11 gezeigten Bildern, wird in diesen ein aktives Propulsionsorgan verwendet. Der Propeller drehte bei dieser Geschwindigkeit mit einer Drehzahl von 11,6 Hz. Auch in diesem Fall gibt es kaum eine Bewegung der Wollfäden, d.h. auch unter Propulsion ist die Strömung anliegende.

Da es sich bei dem Modell um ein Modell mit nur einem Propeller handelt, wurde in einem weiteren Versuch der Propeller gewechselt. Dieser besitzt bei ansonsten identischen Abmessungen eine andere Drehrichtung. Die Geschwindigkeit beträgt 14 km/h in der Großausführung und die Drehzahl beträgt 14,4 Hz.

In Abbildung 2.14 ist das geschlossene Modell nochmal unter  $8^\circ$  Drift mit Propulsion und entsprechend geändertem Drehsinn dargestellt. Die Abbildung zeigt wieder zwei unterschiedliche Zeitpunkte aus dem Highspeedvideo bei der Fahrt über den Fototunnel. Im Bereich des Seekastens bewegen sich die Wollfäden wieder nur minimal. D.h. bei der gewählten Geschwindigkeit und der eingestellten Drehzahl zeigt sich auch in diesem Fall eine anliegende Strömung.

## 2.4 Versuche zu Seekästen

Um den Einfluss des Seekastens und dessen Umströmung auf den Schiffswiderstand zu ermitteln, wurde, nachdem die Versuchsfahrten mit komplett geschlossenem Rumpf abgeschlossen waren, der Rezess geöffnet. Der Rezess steht hier für ein Ersatzmodell eines Seekastens samt Grätting. Das Ersatzmodell wurde auf Grund der zu erwartenden Maßstabeffekte, wie z.B. einer wesentlich dickeren Grenzschicht als in der Großausführung, gewählt und dient zur Validierung der später verwendeten numerischen Methoden. Zudem ist das Ersetzen einer Öffnung durch einen Rezess im Modellversuch ein übliches Verfahren bezüglich der Wirkung auf den Widerstand und die Beeinflussung des Propellerzustroms.

Mit dem nun geöffnetem Seekasten wurden die vorher durchgeführten Versuchsfahrten wiederholt. Auch in diesen Fällen wurden mit der im Fototunnel angebrachten Hochgeschwindigkeitskamera Videoaufnahmen von der Unterseite des fahrenden Modells aufgenommen. Standbilder von repräsentativen Zeitpunkten des Videos sind in Abbildung 2.15 gezeigt. Die Auslenkung der Wollfäden im Bereich der Seekästen ist stark instationär. Dieser Effekt war bei geschlossenem Seekasten so nicht zu beobachten. Daraus kann geschlossen werden, dass die lokale Umströmung der Seekästen einen Beitrag zur Widerstandserhöhung leistet. Im direkten Vergleich zum geschlossenen Modell zeigt sich, dass bei geschlossenem Seekasten keine nennenswerte Bewegung der Wollfäden zu beobachten ist.

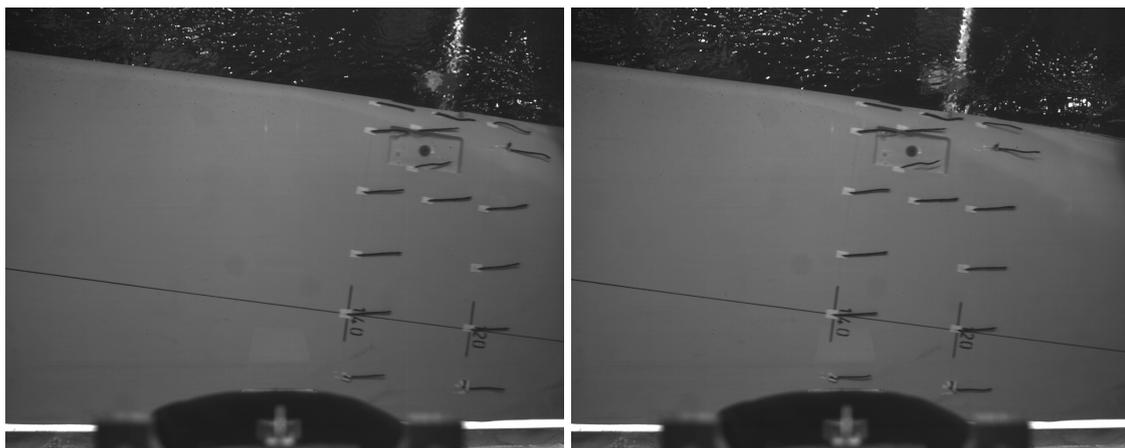


Abb. 2.15: Strömung am geöffneten Rezess unter 8° Drift zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten bei 12 km/h in der Großausführung.

Der Vergleich der Widerstände zwischen geschlossenem und geöffnetem Rezess bei Geradeausfahrt ist in Abbildung 2.16 dargestellt, bei jeweils 12 km/h und 14 km/h in der Großausführung. Analog hierzu zeigt Abbildung 2.17 den Widerstand bei 8° Drift. Sowohl bei der Geradeausfahrt als auch unter Drift wurde bei geöffnetem Rezess eine höhere Widerstandskraft gemessen.

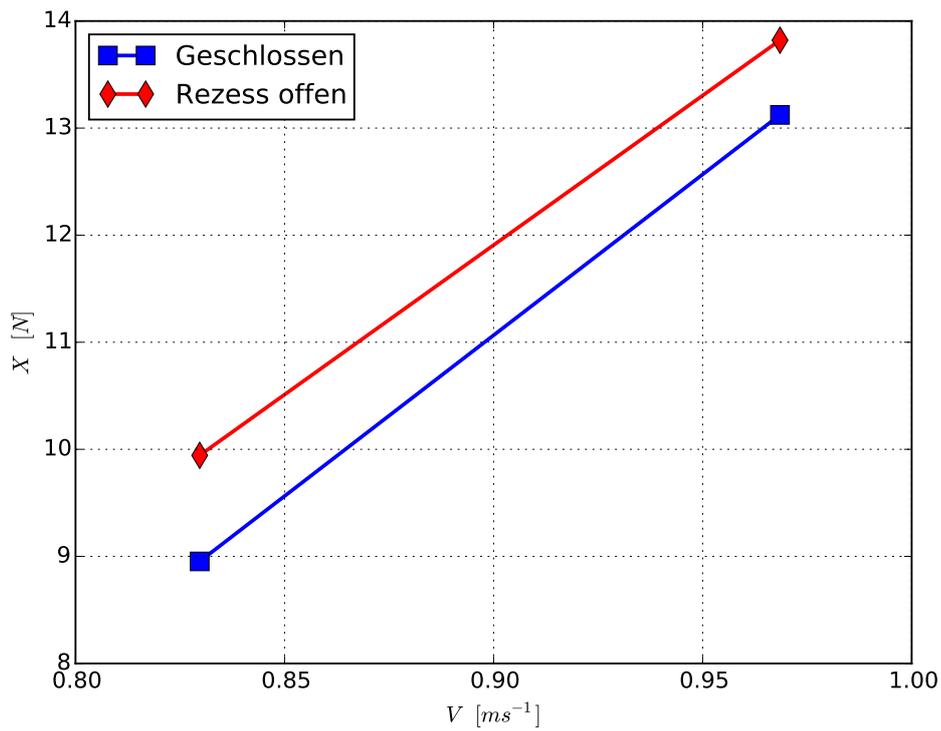


Abb. 2.16: Widerstandsversuch mit geschlossenem und offenem Rezess.

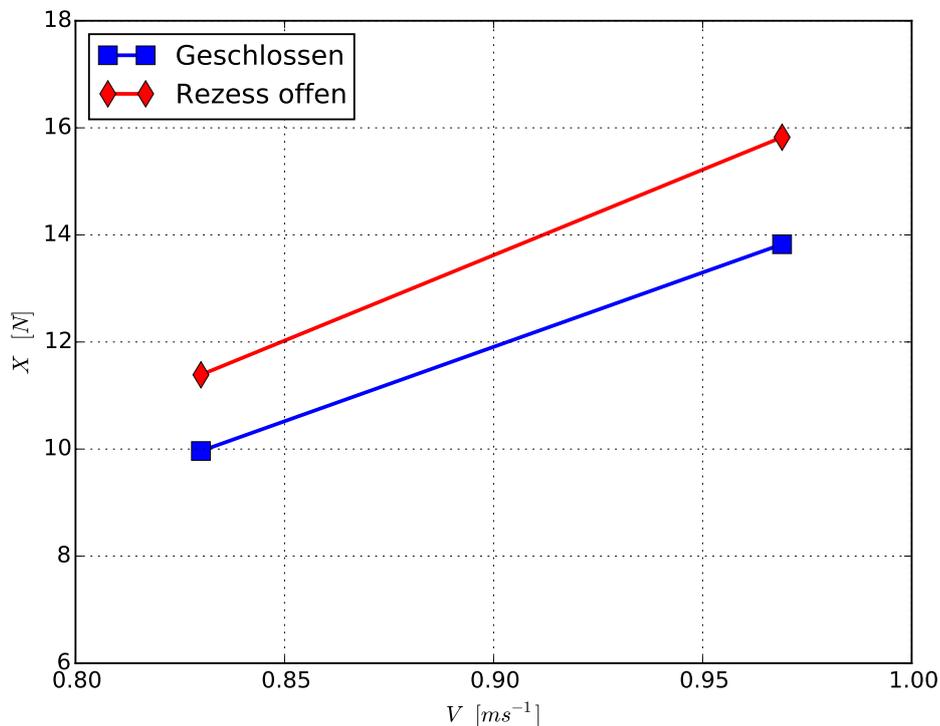


Abb. 2.17: Widerstandsversuch mit geschlossenem und offenem Rezess unter  $8^\circ$  Drift.

## 2.5 Versuche zur Untersuchung von Bugstrahlrudern

Die bisherigen Modellversuche wurden für das Modell ohne zusätzliche Öffnungen und daran anschließend mit geöffnetem Rezess untersucht. Für die Modellversuche mit inaktivem Bugstrahlruder wurde der Rezess nicht wieder geschlossen, so dass in den Messungen für die Bugstrahlruder die Differenz zum Modell mit geöffnetem Rezess betrachtet werden muss. In Abbildung 2.18 sind für die Geschwindigkeiten  $0,83 \text{ m/s}$  und  $0,97 \text{ m/s}$ , welche  $12 \text{ km/h}$  und  $14 \text{ km/h}$  in der Großausführung entsprechen, die gemessenen Widerstände abgetragen. Wie erwartet sind die Widerstände je Geschwindigkeit für das geschlossene Modell am kleinsten. Bezogen auf das geschlossene Modell sind die Widerstände für das Modell mit geöffneten Bugstrahlrudern und geöffnetem Rezess ca. 15% höher.

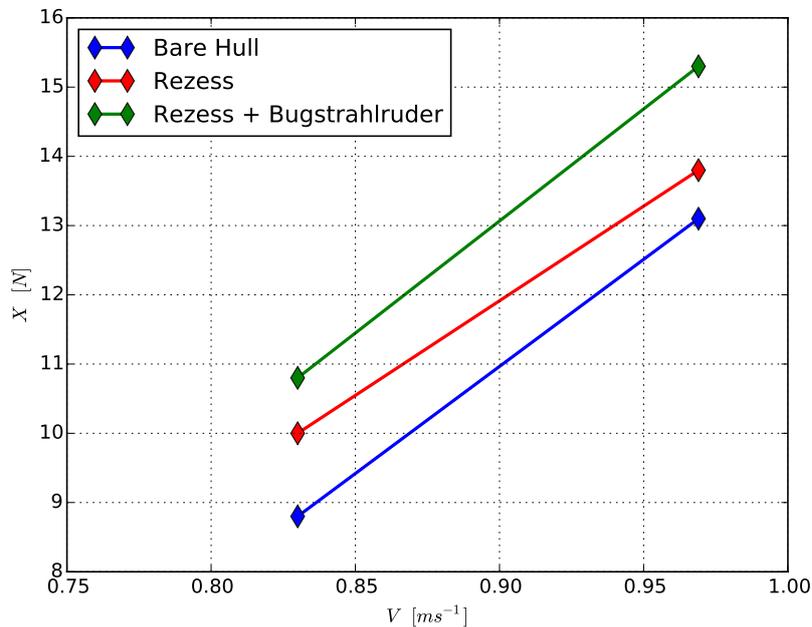


Abb. 2.18: Widerstände ohne/mit geöffnetem Rezess und inaktivem Bugstrahlruder.

Nach den Widerstandsversuchen mit inaktiven Bugstrahlrudern wurden die Untersuchungen nun mit aktiven Bugstrahlrudern durchgeführt.

Für diverse Binnenwasserstraßen existieren Bestimmungen bezüglich der Anforderungen an Bugstrahlanlagen. Auf dem Main ist beispielsweise eine Mindestseitenkraft festgeschrieben, die die Anlagen erzeugen müssen, damit das jeweilige Binnenschiff die Wasserstraße befahren darf [20]. Zur Bestimmung der Seitenkraft werden in der Regel Pfahlzugversuche in der Großausführung durchgeführt. Die von der Bugstrahlanlage erzeugte Seitenkraft wird mit einem Kraftmessglied gemessen.

Laut den Regularien [20] muss ein 110 m langes Binnenschiff bei einem Mindesttiefgang von 2,1 m eine Seitenkraft von mindestens 18 kN erzeugen. Nur wenn dieser Schwellwert überschritten wird, darf das jeweilige Binnenschiff die Binnenwasserstraße befahren. Die Regularien geben auch die Anzahl der Bugstrahlanlagen in Abhängigkeit der Schiffslänge, -klasse und sonstigen Propulsionsorgane vor.

Die erste Versuchsreihe der Modellversuche mit aktivem Bugstrahlruder sind die Pfahlzugversuche der Bugstrahlanlage. Im Gegensatz zu Pfahlzugversuchen an den Hauptpropulsoren wird hier der Standschub in Querrichtung des Modells gemessen (siehe Abbildung 2.19). Entsprechend ist hierbei die Vorausschwindigkeit des Modells null. Die Schubwirkung in

Richtung Backbord ist hier gut an der Auslenkung der sonst ruhigen freien Oberfläche zu erkennen.



Abb. 2.19: Pfahlzugversuch mit aktivem Backbord-Bugstrahlruder nach Steuerbord gerichtet.

Im Rahmen dieser Messungen wurden beide Anlagen jeweils getrennt voneinander, entsprechend der vorherigen Systematik, untersucht. Die Abstrahlrichtung wurde ebenfalls zwischen backbord (BB), voraus (V) und steuerbord (ST) variiert. Die aus diesen Messungen gewonnenen Daten bezüglich der erzeugten Querkräfte  $Y$  sind in Abbildung 2.20 über der Impellerdrehzahl  $n$  aufgetragen. Dabei bedeutet „BB nach BB“, dass das Backbord-Bugstrahlruder nach Backbord gerichtet ist, also Schub nach steuerbord erzeugt. Weitere Bezeichnungen sind analog.

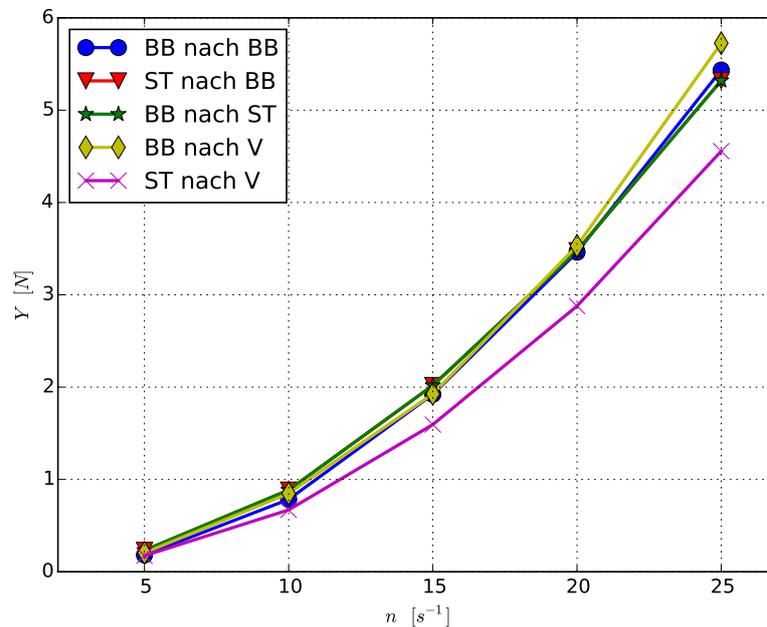


Abb. 2.20: Schubkräfte bei Pfahlzugversuchen mit unterschiedlicher Abstrahlrichtung.

Die durch das Bugstrahlruder erzeugten Schubkräfte zeigen nur geringe Abweichungen untereinander. Hervorzuheben sind die Fälle, in denen die Abstrahlrichtung nach vorne gerichtet ist. Im Fall des Backbord-Bugstrahlruders, dessen Abstrahlkanal als Stichkanal durch den Bugbereich ausgeführt ist, liegt die erzeugte Kraft etwas über den in Querrichtung erzeugten Kräften. Besonders auffällig ist der Fall „ST nach V“, denn die erzeugten Kräfte liegen im Vergleich zu den anderen Pfahlzügen deutlich niedriger. Diese Differenz beträgt etwa 15%. Dieser signifikante Unterschied ist auf die unterschiedlichen Führungen der Abstrahlkanäle zurückzuführen. Dieser Kanal wird hier in einem Winkel von circa  $27^\circ$  zur Horizontalen abwärts geführt, siehe Abbildung 2.2.

Die nächsten Versuche wurden mit aktiven Bugstrahlanlagen unter Vorausschwindigkeit des Modells gefahren. Beide Bugstrahlanlagen strahlen in Richtung Backbord ab und die jeweilige Drehzahl der Anlagen wurde so eingestellt, dass sich eine ähnliche Querkraft einstellt. Diese Daten wurden aus den vorher durchgeführten Pfahlzuguntersuchungen entnommen. Die vom Backbord (BB), dem Steuerbord (ST) und von beiden Bugstrahlrudern erzeugten Querkräfte sind in Abbildung 2.21 dargestellt. In allen drei Fällen nimmt die erzeugte Querkraft mit steigender Geschwindigkeit ab. Auffällig ist der wesentlich stärkere Abfall der Querkraft für das Steuerbord-Bugstrahlruder, welches unmittelbar vor dem

Laderaum eingebaut ist. Ab einer Modellgeschwindigkeit von 0,3 m/s bricht die erzeugte Querkraft ein und erreicht nur noch etwa die Hälfte der Querkraft, die bei geringerer Voraugeschwindigkeit erzeugt wird. Bei der größten Geschwindigkeit beträgt dieser Anteil etwas mehr als 30%.

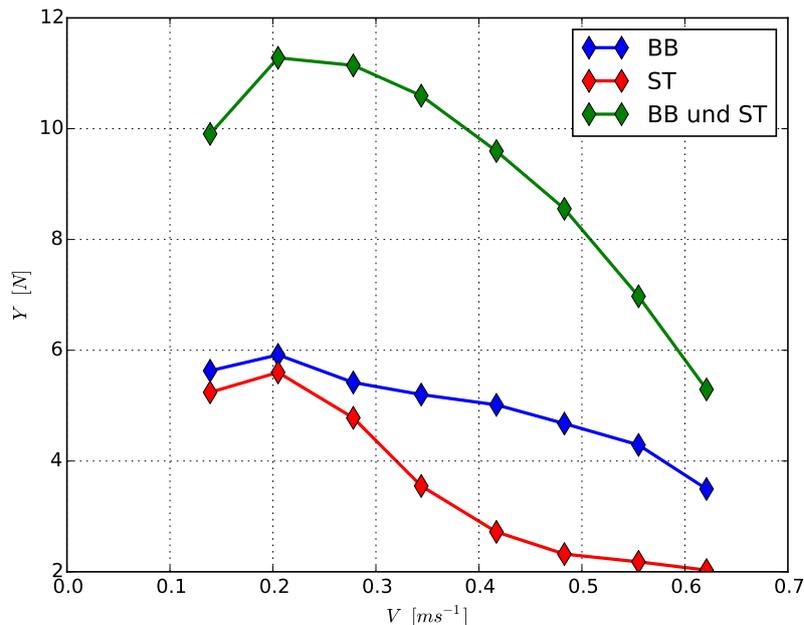


Abb. 2.21: Querkräfte bei aktivem Bugstrahlruder mit Voraugeschwindigkeit.

Das Backbord-Bugstrahlruder verhält sich dagegen völlig anders. Bei der größten Geschwindigkeit erreicht dieses Bugstrahlruder noch circa 60% der Querkraft  $Y$ , die bei kleiner Voraugeschwindigkeit erzeugt wird. Sind beide Bugstrahlruder aktiv, dass sich die erzeugten Querkräfte nicht einfach addieren. Dies ist für größeren Modellgeschwindigkeiten besonders ausgeprägt. Vergleicht man zusätzlich die gemessene Widerstandskraft (siehe Abbildung 2.22) so zeigt sich, dass sich der Widerstand zwischen ein und zwei Bugstrahlrudern ändert. Dies ist der Problematik geschuldet, dass gleichzeitig sowohl Querkräfte als auch Längskräfte gemessen wurden. Obwohl die Messglieder für die Querkraftmessung so nah wie technisch möglich an die Krafteinleitungspunkte der Bugstrahlruder herangeführt wurden, scheint das Modell unter Aufbringung der Querkraft ein wenig unter Drift geraten zu sein, was sowohl die Längskraft erhöht als auch die Größe der Querkraft beeinflusst.

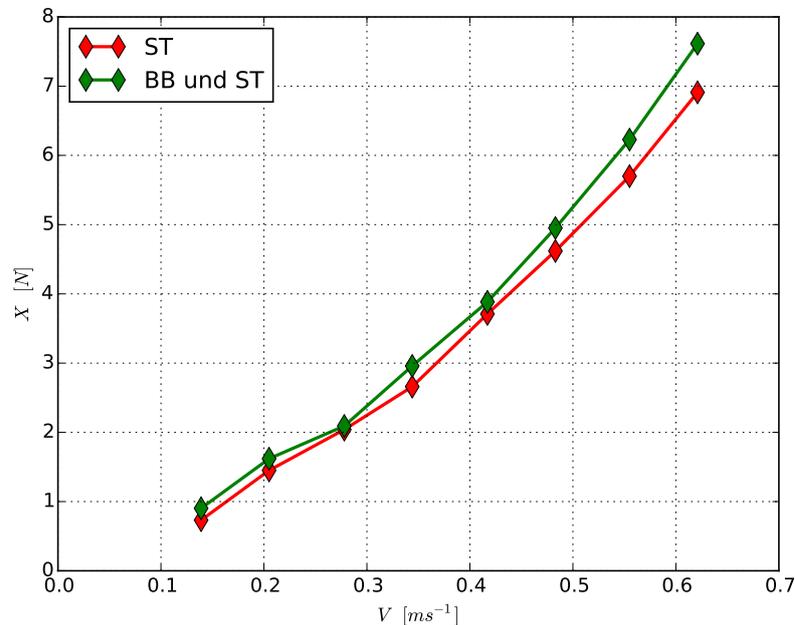


Abb. 2.22: Widerstand bei aktivem Bugstrahlruder mit Vorausgeschwindigkeit.

## 2.6 Particle Image Velocimetry

Im Rahmen der Validierungsversuche wurde neben den integralen Kraftwirkungen am Modell auch das komplexe Strömungsfeld direkt aufgemessen. Nachstehend wird das eingesetzte Verfahren der Particle Image Velocimetry (PIV) zunächst allgemein beschrieben. Im weiteren Verlauf folgen dann eine Beschreibung des verwendeten PIV-Systems und des Versuchsaufbaus sowie exemplarische Ergebnisse.

### 2.6.1 Verfahren

Bei der PIV wird die Bewegung von Tracer- oder Seeding-Partikeln in einem Lichtschnitt, der von einem gepulsten Laser mit entsprechender Lichtschnittoptik aufgespannt wird, zur quantitativen Erfassung von Strömungsfeldern genutzt. Das an den Partikeln gestreute Licht wird während der wenige Nanosekunden andauernden Pulse des Lasers mit einer oder mehreren Digitalkamera(s) aufgezeichnet. Eine Kalibrierung des Bildausschnitts erlaubt eine

Umrechnung der in Bildpunkten ausgewerteten Partikelbewegung in reale Längeneinheiten. Mit dem bekannten zeitlichen Abstand zwischen den Lichtpulsen können die Geschwindigkeitskomponenten berechnet werden. Dies geschieht nicht für einzelne Partikel, sondern mittels einer Kreuzkorrelation für Teilgebiete wählbarer Größe innerhalb der Abbildung. Aus jedem Doppelbild resultieren daher Vektorfelder der Geschwindigkeiten auf einem festen Raster. Zwei exemplarische Rohbilder aus einer einfachen Anwendung mit nur einer orthogonal zum Lichtschnitt montierten Kamera und das dazugehörige, hier extrem grob aufgelöste, Vektorfeld zeigt Abbildung 2.23.

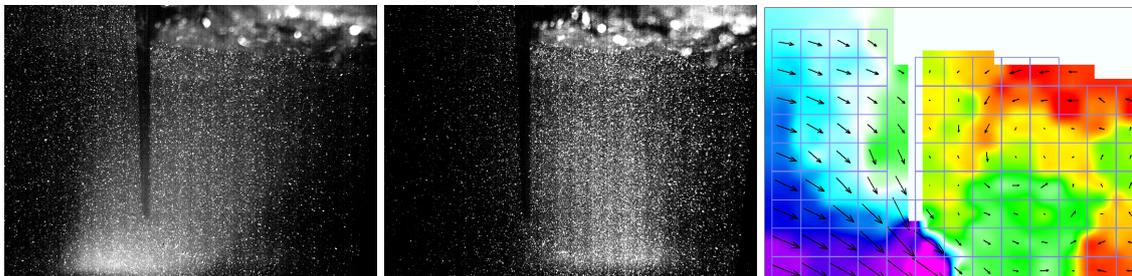


Abb. 2.23: Exemplarische Partikelbilder einer Messung aufgenommen in einem Abstand von 3 ms und das dazugehörige Vektorfeld. Die unterschiedliche Ausleuchtung ist verursacht durch die Intensitätsverteilung der beiden Kavitäten des Lasers. Der Farbverlauf zeigt die horizontale Geschwindigkeitskomponente. Darüberhinaus sind die Grenzen der Teilgebiete zur Bestimmung der Vektoren dargestellt.

Die Verwendung von mehreren Kameras, die den gleichen Ausschnitt aus unterschiedlichen Perspektiven erfassen in sogenannten Stereo- oder 3C-PIV-Anordnungen erlaubt anhand der endlichen Dicke des Lichtschnitts und der scheinbaren Verschiebung der Partikel aus verschiedenen Blickwinkeln (Parallaxe) auch die Erfassung der Geschwindigkeitskomponenten normal zur Lichtschnittebene. Hierbei sind jedoch, bei gleichzeitig erhöhter Unsicherheit der Messergebnisse, die Anforderungen an den optischen Zugang, die Pulsenergie des Lasers und eine exakte Kalibrierung deutlich höher als in einem klassischen 2C-Aufbau. Besonders die weitgehend entfallende Verzerrung des Bildes beim rechtwinkligen Strahlengang zwischen Luft, Glas und Wasser mit jeweils unterschiedlichen Brechungseigenschaften begünstigt Messungen, bei denen die Strömung nicht dreidimensional aufgelöst wird.

Neben einer sorgfältigen Kalibrierung besitzen die Auswahl und die Verteilung der Seeding-Partikel höchste Bedeutung für die Qualität der Messungen. Hier muss zwischen optimalem Kontrast der Rohbilder und minimaler Beeinflussung der Strömung abgewogen werden. Große Partikel streuen mehr Licht, während kleine Partikel der Strömung besser folgen.

Neben der Größe muss mit Blick auf die Dichte und die Streuung auch das Material der Partikel sorgfältig ausgewählt werden. Bei PIV-Anwendungen in Wasser werden häufig Partikel aus Polyamid oder hohle, teilweise silberbeschichtete Glaskugeln genutzt, welche mit einer Dichte von mehr als  $1000 \text{ kg/m}^3$  unterschiedlich schnell absinken.

Besteht das Risiko, dass Luftblasen den Lichtschnitt passieren, kann dies aufgrund der sehr starken Streuung oder in Fällen einer Totalreflektion zu Schäden an den Sensoren der Kameras führen. Auch Reflektionen an der freien Wasseroberfläche oder am Modell können so intensiv sein, dass sie zumindest die Erfassung der Signale der Partikel in einem Teil des Bildes erschweren. In diesen Fällen kann die Verwendung fluoreszierender Partikel Vorteile bieten. Mit einem Fluoreszenzfarbstoff wie Rhodamin-B dotierte Partikel emittieren bei Anregung mit dem grünem Licht des Lasers entsprechend einer Wellenlänge von 532 nm oranges Licht mit einer Wellenlänge von etwa 600 nm. Bei Verwendung eines entsprechenden Farbfilters können die unerwünschten grünen Reflektionen unterdrückt werden und man erhält auch in schwierigen Situationen, trotz der im Vergleich zur Reflektion geringeren Intensität der Fluoreszenz, kontrastreiche Rohbilder. Ein weiterer Vorteil dieser Partikel ist die gleichmäßige Emission des Lichts in alle Richtungen.

Besonders bei PIV-Anwendungen mit großen Volumina zu seedenden Wassers rücken jedoch zwei Nachteile der fluoreszierenden Partikel in den Vordergrund. Zum einen sind die kommerziell erhältlichen Partikel extrem kostenintensiv. Zum anderen sind die Fluoreszenzfarbstoffe mit günstigen Eigenschaften für die Anregung mit Licht der Wellenlänge 532 nm als potentiell krebserregend und wassergefährdend eingestuft. Auch geringe Mengen des so dotierten Wassers dürfen nicht über die Kanalisation entsorgt werden.

Aus diesen Gründen wurde in diesem Projekt ein anderer Ansatz gewählt, der ebenfalls die Störung durch ungewünschte Reflektionen minimiert und auf dem Prinzip der Fluoreszenz basiert. Anstelle der Partikel wurde die Oberfläche des Modells und der Anhänge mit einem entsprechenden Lack behandelt, so dass ein Großteil der Reflektionen mit Bandpassfiltern optisch unterdrückt werden konnte. Abbildung 2.24 zeigt das entsprechend fluoreszierend pink lackierte Vorschiff des Versuchsmodells und das dazugehörige Erscheinungsbild im Lichtschnitt des Lasers.

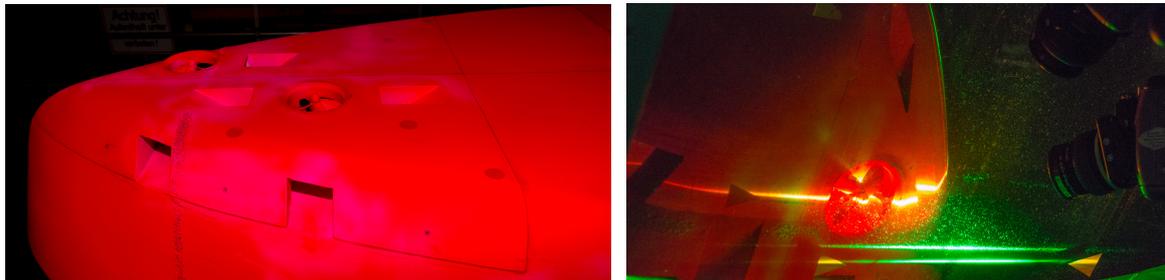


Abb. 2.24: Mit Fluoreszenzlack beschichtetes Modell in Tageslicht und im Lichtschnitt.

### 2.6.2 Aufbau

Das am DST eingesetzte PIV-System des Instituts für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme der Universität Duisburg-Essen arbeitet mit einer nominellen Frequenz von 100 Hz und beinhaltet neben dem Laser zwei Hochgeschwindigkeitskameras mit verschiedenen Objektiven und Filtern. Weitere Details des Systems enthält die folgende Aufstellung:

**Laser** InnoLas SpitLight PIV Compact 100: Frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser mit zwei Diodengepumpten Kavitäten, einer Pulsenergie von 60 mJ bei 532 nm und einer Frequenz von 100 Hz.

**Kameras** Zwei VisionResearch Phantom v9.1 CMOS Kameras mit je 2 MP und 6 GB integriertem Speicher. Mit einer Farbtiefe von 14 bit erlauben diese Kameras auch bei schwierigen Belichtungssituationen hinreichend kontrastreiche Aufnahmen. Die Datenübertragung erfolgt mittels Gigabit-Ethernet.

**Optisches Zubehör** Nikon F-Mount Objektive mit Brennweiten von 50, 35 und 24 mm mit verschiedenen optischen Filtern sowie Scheimpflugadapter für die Fokussierung auf eine relativ zum Sensor verkippte Bildebene.

**Steuerung und Datenaufzeichnung** HighSpeed Controller für flexible externe und interne Triggeroptionen und PC mit der Software LaVision DaVis 8.0.

**Postprocessing** Die finale Auswertung der Daten erfolgt mit LaVision DaVis 8.2.

Im Rahmen des hier dargestellten Forschungsvorhabens waren die PIV-Daten ergänzend zu den integralen Messgrößen zur Validierung der numerischen Simulationen vorgesehen. Die komplexen Strömungsvorgänge in verschiedenen Szenarios sowie die Optionen zur

Anordnung von Laser und Lichtschnitt erforderten einen Stereo-PIV Aufbau. Aufgrund der begrenzten Tankzeit und des komplexen Versuchsplans, mussten die PIV-Messungen in den laufenden Versuchsbetrieb integriert werden, was zu teils vorhergesehenen aber auch zu unvorhergesehenen Schwierigkeiten für die PIV-Messungen führte. Da Versuche mit geringer Kielfreiheit und auch mit Drift durchgeführt wurden, musste der gesamte Tankquerschnitt über dem Beobachtungstunnel freigehalten werden. Somit waren Anordnungen mit im Wasser installierten Spiegeln, wie sie in anderen Projekten erfolgreich realisiert wurden, nicht möglich. Für eine entsprechende Stereoanordnung von Kameras und Lichtschnitt wurden die Kameras in einem unsymmetrischen Aufbau mit relativ flachen Winkeln zur Acrylglas Scheibe des Tanks angeordnet. Abbildung 2.25 zeigt die beiden Hochgeschwindigkeitskameras, die mit unterschiedlichen Objektiven einen möglichst weitgehend überlappenden Bildausschnitt erfassen. Der Versuch, die Brechung der optischen Strahlen am Übergang in den optisch dichtere Acrylglas mit einem Prisma zu reduzieren, scheiterte an unvermeidbaren Lufteinschlüssen an der horizontalen Trennfläche.

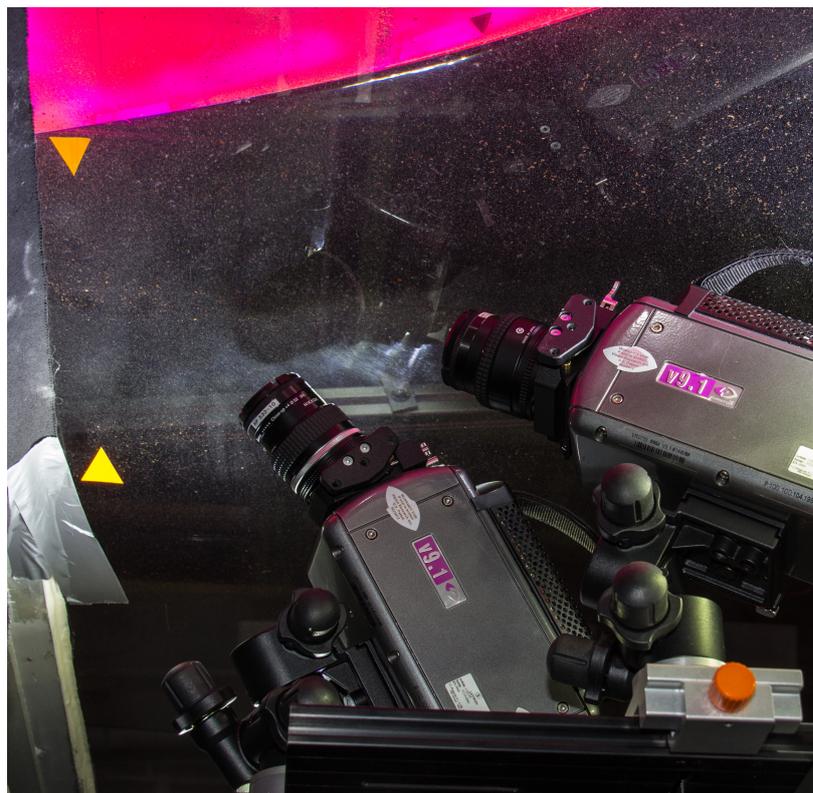


Abb. 2.25: Anordnung der PIV-Kameras im Fototunnel.

Eine weitere Schwierigkeit der simultanen Versuche zur Messung der integralen Größen und der Strömungsfelder liegt in den unterschiedlichen Anforderungen bezüglich der Wartezeit zwischen mehreren Versuchen. Während bei konventionellen Versuchen eine bestmögliche Wasserberuhigung erforderlich ist, liegt bei PIV-Messungen der Fokus auf einer gleichmäßigen und guten Partikelverteilung. Da die verwendeten Polyamid-Partikel eine größere Dichte als das Tankwasser besitzen, sinken sie innerhalb weniger Minuten auf den Tankboden ab, wo sie wiederum den optischen Zugang für Laserlicht und Kameras erschweren. Somit konnten für die meisten am passierenden Modell aufgezeichneten Bild-Quadrupel mangels hinreichender Partikeldichte nur wenige Vektoren ausgewertet werden. Die Ergänzung der fehlenden Vektoren und eine Mittelung der hochgradig instationären Strömung hätte eine mindestens 10-fache Wiederholung jeder einzelnen Konfiguration erfordert, was zeitlich nicht darstellbar war. Dementsprechend können hier hauptsächlich die Messungen unter Pfahlzugbedingungen zur Validierung herangezogen werden. Ohne Vorausgeschwindigkeit des Modells kann sowohl eine gute Partikeldichte sichergestellt werden als auch eine Mittelung über die gesamten 900 Zeitschritte erfolgen.

### **2.6.3 Ergebnisse**

Die Aufzeichnung der Vektorfelder erfolgte in einem Bildausschnitt von etwa 200 mm Höhe und 150 mm Breite mit einer Doppelbild-Frequenz von 100 Hz. Die zeitlich aufgelösten Auswertungen bestätigten die ausgeprägten instationären Strömungsverhältnisse mit stochastischer Ausbildung von kleinen und großen Wirbeln. Für die Validierung der CFD-Simulationen wurden die PIV-Daten aus einem Messintervall von bis zu 9 Sekunden gemittelt. Die nachstehende Abbildung 2.26 zeigt exemplarisch entsprechende Vektorfelder unter dem Ansaugbereich und der achteren Austrittsöffnung bei laufender Bugstrahlanlage und sehr geringer Vorausgeschwindigkeit des Modells von 0,03 m/s.

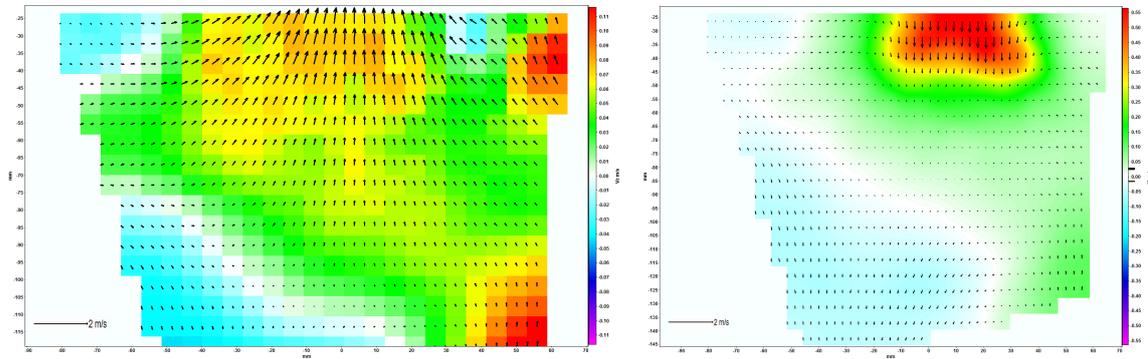


Abb. 2.26: Vektorfelder bei laufender Bugstrahlanlage im Ansaug- (links) und Austrittsbereich (rechts).

Die Strahlausbreitung an der achterlichen Bugstrahlanlage zeigt Abbildung 2.27. In dieser Darstellung wurde ein exemplarisches Rohbild hinterlegt, bei dem zu Gunsten besserer Kontraste Pixel mit Intensität unterhalb eines Schwellwerts weiß gefärbt wurden. Als farbiger Contourplot wurde die Wirbelintensität um die Achse normal zum Querschnitt gewählt. Die Vektoren zeigen die Geschwindigkeitskomponenten in der Ebene. Weitere Ergebnisse sind im Zusammenhang mit der CFD-Validierung im entsprechenden Kapitel 3.3 dargestellt.

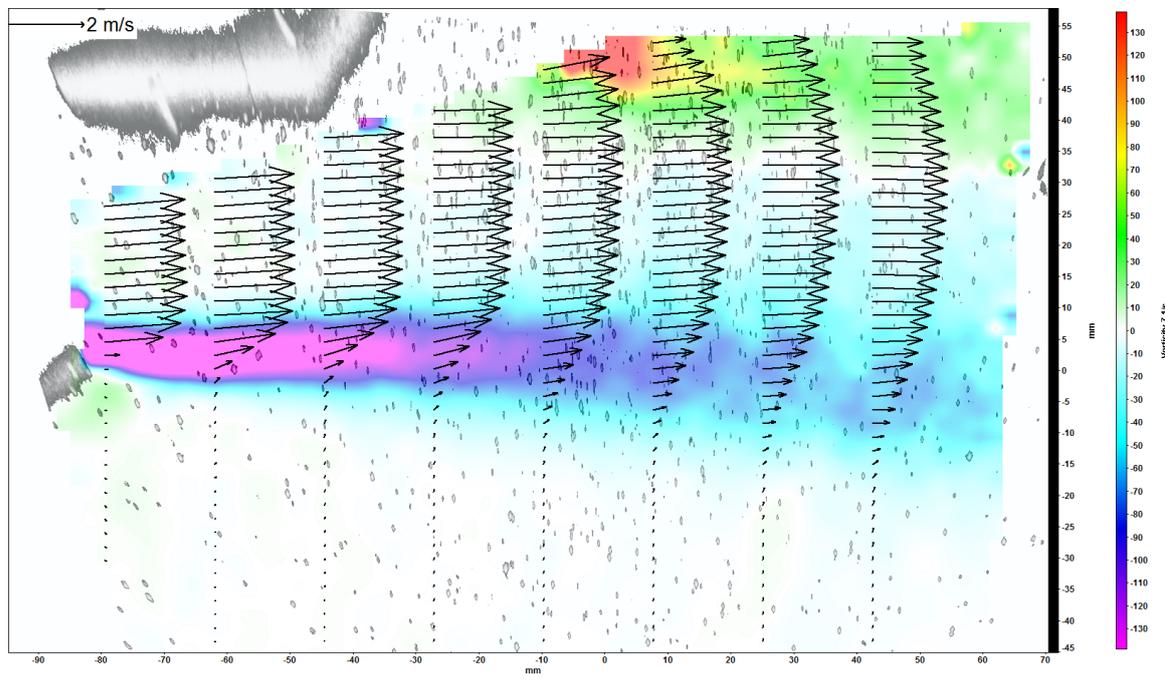


Abb. 2.27: Strahlausbreitung am seitlichen Austritt der achteren Bugstrahlanlage. Die Vektoren zeigen die Geschwindigkeitskomponenten in der Ebene, der farbliche Contourplot die Wirbelintensität um die Normalachse. Zudem wurde ein bearbeitetes Rohbild überlagert, in dem oben links die Reflektionen an der Modelloberfläche zu erkennen sind.

# 3 Numerische Methoden und deren Validierung am Modellversuch

Numerische Simulationen von Schiffsumströmungen sind heutzutage nicht mehr aus dem Alltag von Versuchsanstalten wegzudenken. Nicht zuletzt, weil so zum einen Strömungsphänomene begutachtet werden können, die im Modellversuch unmöglich zu messen sind. Weiterhin können Geometrievariationen vergleichsweise kostengünstig durchgeführt werden, da der Modellbau gänzlich entfällt. Dies ist insbesondere im Rahmen dieses Forschungsvorhabens von großem Nutzen, da diverse Anordnungen von Bugstrahlanlagen und Seekästen untersucht werden können.

Die Hauptziele der numerischen Untersuchungen sind zum einen die Bestimmung des Gesamtwiderstandes bei verschiedenen Anordnungen der Bugstrahlanlagen und Seekästen sowie die Analyse der auftretenden Strömungsvorgänge. Insbesondere im Hinblick auf die Geschwindigkeitsabhängige Wirksamkeit der Bugstrahlanlagen sowie die Durchströmung der Seekästen. Beide Schwerpunkte wurden sowohl bei Geradeausfahrt als auch bei Driftfahrt untersucht.

Für die CFD-Untersuchungen wird das Open Source Programmpaket OpenFOAM verwendet. Hierbei handelt es sich um eine sowohl in der Industrie als auch im akademischen Umfeld etablierte Bibliothek, die eine Vielzahl von verschiedenen Strömungsvorgängen mittels Finite-Volumen (FV) Verfahren abbilden kann.

## 3.1 Numerisches Verfahren

Das FV-Verfahren in OpenFOAM unterstützt beliebig unstrukturierte Gitter sowie beliebige Formen von Volumenzellen, wodurch auch komplexe Geometrien mit hinreichender Zell-

qualität diskretisiert werden können (siehe [9]). Im Rahmen dieses Vorhabens wurden zwei verschiedene Fluid-Modelle verwendet. Ein Großteil der Untersuchungen wurde, basierend auf einem stationären Einphasenmodell durchgeführt, da hierbei die Rechenzeiten signifikant verkürzt werden. Um diese Annahme untermauern zu können, wurden für ausgewählte Extremfälle ebenfalls transiente Berechnungen mit einem Zweiphasenmodell (Luft und Wasser) angestellt. Im Folgenden werden die verwendeten Lösungsverfahren dargestellt.

### 3.1.1 Stationäre Einphasenströmung

Zur Simulation der stationären Einphasenströmung enthält das Programmpaket OpenFOAM den Löser `simpleFoam`, der die Navier-Stokes-Gleichungen für einphasige, stationäre, isotherme und inkompressible Fluide löst:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{UU}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + \mathbf{S}_b \quad (3.2)$$

Hier wird die vektorielle Geschwindigkeit durch  $\mathbf{U}$  und die Fluidichte durch  $\rho$  repräsentiert.  $\nu$ ,  $p$  und  $\mathbf{S}_b$  stellen die kinematische Viskosität, den Druck und die Volumenkräfte dar. Alle Terme der unvereinfachten Navier-Stokes-Gleichungen, die unter den genannten Annahmen Null ergeben, sind bereits entfernt (siehe [2]).

Zur Kopplung von Druck und Geschwindigkeit wird in diesem Fall der SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)-Algorithmus verwendet, wie in [2, 23] beschrieben. Die grundsätzlichen Schritte des SIMPLE-Verfahrens sind Abbildung 3.1 zu entnehmen.

Weitere Informationen zur semi-diskreten Schreibweise der jeweiligen Terme in der Implementierung von OpenFOAM sind in [2, 7, 23] zu finden.

Da die Turbulenzmodellierung in OpenFOAM generisch ist, kann der Löser sowohl im laminaren Modus als auch im RANS- oder LES-Modus betrieben werden [9]. Unabhängig vom ausgewählten Modell muss hier eines der eben genannten Modi gewählt werden, um die Navier-Stokes-Gleichungen zu schließen [12]. Hierzu muss lediglich ein entsprechendes Modell ausgewählt und die notwendigen Randbedingungen gesetzt werden. Aus der Erfah-

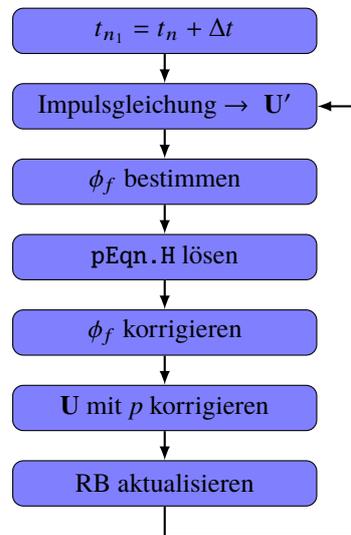


Abb. 3.1: Flussdiagramm des SIMPLE-Verfahrens.

ung heraus hat sich das RANS-Modell  $k - \omega$  SST nach Menter [11, 12] als besonders geeignet für Schiffsumströmungen herausgestellt.

### 3.1.2 Instationäre Zweiphasenströmung

Für Zweiphasenströmungen können entweder der Löser `interFoam` oder `LTSInterFoam` verwendet werden, wobei letzterer bei quasi-stationären Vorgängen deutlich schneller zu einer konvergenten Lösung kommt, als es der völlig instationäre `interFoam` tut. Dies wird unter anderem durch die Verwendung eines lokalen Zeitschrittes erreicht, der es erlaubt, die Lösung schnell vorwärts zu treiben. `interFoam` hingegen verwendet einen globalen Zeitschritt, der in Unterzeitschritte unterteilt werden kann, in denen die Volumenfraktion sukzessive transportiert wird.

Bei beiden Lösungsverfahren werden die beiden Phasen mittels Volume-of-Fluid (VoF) [3] unterschieden und transportiert (siehe Gleichung (3.3)). Hierbei wird ein zusätzliches Skalarfeld  $\alpha \in [0; 1]$  eingeführt, welches die relative Füllung mit dem ersten Fluid angibt.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\alpha) = 0 \quad (3.3)$$

Um das durch die Numerik bedingte Verschmieren der Phasengrenze zu reduzieren, haben Rusche [15], Ubbink [19] und Weller [21] einen Term zu Gleichung (3.3) hinzugefügt, der die Phasengrenze künstlich komprimiert:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\alpha) + \nabla \cdot (\mathbf{U}_r \alpha (1 - \alpha)) = 0. \quad (3.4)$$

Dieser letzte Term beinhaltet eine künstliche Geschwindigkeit, die normal zur Phasengrenze wirkt  $\mathbf{U}_r$ , durch die die Komprimierung erfolgt. Weiterhin ist es empfehlenswert, diesen Term - der als eine Art Sprungfunktion zu begreifen ist - mit einem besonderen Schema zu diskretisieren. Nicht zuletzt muss die gewählte Diskretisierung beschränkt sein, wie von Jasak, Weller und Gosman [8] gezeigt. Weller [22] beschreibt ein solches Schema zweiter Ordnung für den skalaren Transport und vergleicht dies mit existierenden TVD/NVD artigen Schemata. Laut Weller [22] eignet es sich ebenfalls für Gitter mit starken Nichtorthogonalitäten, da es eine Korrektur für diese enthält.

Um die Navier-Stokes-Gleichungen nicht für jedes Fluid separat lösen zu müssen, werden die Fluideigenschaften, wie die Dichte  $\rho$  und die kinematische Viskosität  $\nu$ , zwischen den jeweiligen Fluiden linear interpoliert:

$$\rho = \rho_1 \alpha + \rho_2 (1 - \alpha) \quad (3.5)$$

$$\nu = \nu_1 \alpha + \nu_2 (1 - \alpha) \quad (3.6)$$

Mit der Version 2.3.2 von OpenFOAM ist es möglich, die Transportgleichung (3.4) semi-implizit zu lösen, was in Verbindung mit dem PIMPLE-Algorithmus zur Druck-Geschwindigkeitskopplung vergleichsweise große Courantzahlen [1, 2] erlaubt. Dies schlägt sich sehr positiv in der benötigten Rechenzeit nieder. Ein Flussdiagramm vom PIMPLE-Verfahren ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Im Vergleich zum SIMPLE-Algorithmus, wie er in Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde, ist der PIMPLE-Algorithmus eine Kombination aus SIMPLE und PISO [2, 6]. Je nach Wahl der äußeren und inneren Iterationen kann PIMPLE auf PISO bzw. SIMPLE reduziert werden.

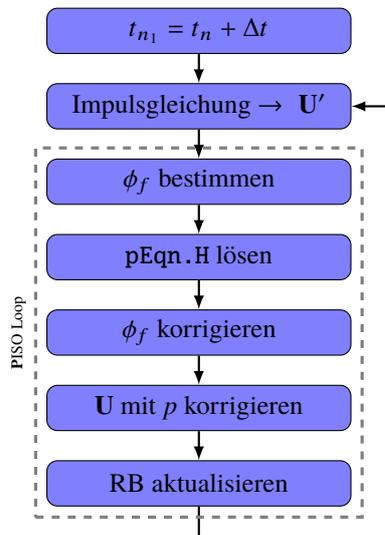


Abb. 3.2: Flussdiagramm des PIMPLE Verfahrens.

### 3.1.3 Volumenkraftmodell

Ein Volumenkraftmodell kann im schiffstechnischen Kontext zur recheneffizienten Modellierung der Propeller-induzierten Kräfte herangezogen werden. Dies wird typischerweise auch als “Kraft-Scheiben” oder “Aktuatorscheibenmodell” beschrieben. Im Gegensatz zur geometrischen Modellierung des Propellers wird hierbei lediglich die Wirkung des Propellers auf das umgebende Fluid approximiert. Hierbei wird die Volumenkraft  $\mathbf{S}_b$  wie folgt bestimmt:

$$\mathbf{S}_b = \mathbf{F}_k V_k. \quad (3.7)$$

Wie genau die jeweilige Kraft  $\mathbf{F}_k$  berechnet wird, hängt vom gewählten Propellermodell ab. Es existiert eine Vielzahl von Propellermodellen, die in ihrer Komplexität stark variieren: Hough und Ordway [5] stellen ein vergleichsweise einfaches Modell vor, welches lediglich eine Radialverteilung des Schubes berücksichtigt und auf Schub- und Drehmomentbeiwerten beruht ( $K_T, K_Q$ ). Simonsen und Stern [17] hingegen verwenden für Manövriersimulationen ein auf der Potentialtheorie beruhendes Verfahren, welches die in der Propellerebene vorliegenden Geschwindigkeiten berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Vorhabens muss jedoch ein anderes Modell verwendet werden, da die Impeller der Bugstrahlanlagen nicht vollkommen mit einem Propeller hinter dem Schiff vergleichbar sind. Unter anderem muss der Punkt des maximalen Schubes auf dem Propel-

lerblatt verschiebbar sein, um die düsenartige Konfiguration des Impellers entsprechend zu berücksichtigen. Hoekstra [4] hat ein solches Modell vorgestellt, welches weiterhin die Rotation des Propellerstrahls berücksichtigt. Weiterhin ist das Modell von Hoekstra für Düsenpropeller entwickelt worden, was dem Aufbau der Bugstrahlanlagen relativ nahe kommt. Dieses Modell wurde in OpenFOAM implementiert, um den Impeller so nah wie möglich nachzuempfinden und den Nachstrom mit den PIV-Messungen vergleichbar zu machen.

Die radiale Schubverteilung im Modell nach Hoekstra [4] ist durch folgende Beziehung gegeben:

$$\frac{f_x(\hat{r})}{F} = \hat{r}^m \left( \frac{a - \hat{r}}{a} \right)^n \quad \text{und} \quad \hat{r} = \frac{r - r_{\text{hub}}}{R - r_{\text{hub}}}, \quad \text{mit } (r_{\text{hub}} \leq r \leq R). \quad (3.8)$$

Hier ist  $F$  die gewählte Schubkraft, die, integriert über die Propellerscheibe, dem Gesamtschub entspricht.  $f_x$  stellt die axiale Kraft dar und  $R$  und  $r_{\text{hub}}$  repräsentieren jeweils den Propeller- und Nabenradius.  $m$ ,  $n$  und  $a$  sind Parameter, die vom Benutzer sinnvoll gewählt werden müssen. Für einen Düsenpropeller werden folgende Werte empfohlen:  $m = 1$ ,  $n = 0.2$  und  $a = 1$ .

Tangentialkräfte werden durch folgende Gleichung zum Modell hinzugefügt:

$$\frac{f_\theta}{f_x} = \frac{P}{2\pi r} = \frac{P}{\pi \frac{r}{R} D} \quad \text{mit } (r_{\text{hub}} \leq r \leq R). \quad (3.9)$$

Die Tangentialkraft ist hier durch  $f_\theta$  dargestellt und das Steigungsverhältnis ist, wie im schiffbaulichen Kontext üblich, durch  $P/D$  berücksichtigt.

Seit der OpenFOAM-Version 2.3 ist die Verwendung von Quelltermen in OpenFOAM nicht mehr Löser-spezifisch, sondern in einer unabhängigen Klassenhierarchie `fvOptions` implementiert. Hierbei sind die jeweiligen Modelle, wie z.B. Turbulenzmodelle, zur Laufzeit auswählbar. Die Zellen, in denen die Volumenkräfte aufgebracht werden, werden im Pre-processing mittels `cellSet` oder `cellZone` ausgewählt. Zur Implementierung eines neuen Volumenkraftmodells ist es lediglich notwendig, von der Basisklasse `fvOption` zu erben. Durch diese Art der Gestaltung ist es möglich, die selbe Implementierung für jeden Löser in OpenFOAM zu verwenden.

### 3.1.4 Randbedingungen

Neben der geometrischen Beschreibung des Problems durch randangepasste Gitter, müssen an den Grenzen des Lösungsgebietes entsprechend der erforderlichen Modellierung, Bedingungen vorgegeben werden, die die Physik hinreichend beschreiben. Hierbei wird unterschieden zwischen Begrenzungen, die durch das System festgelegt werden, wie zum Beispiel die vorhandene Geometrie (Rumpf, Kanal) und Begrenzungen, die die Unendlichkeit reduzieren (Anfang und Ende des Kanals, obere Begrenzung). An allen Rändern müssen Bedingungen definiert werden. Das können Werte der Lösung im Definitionsbereich sein (Dirichlet-Bedingungen) oder auch Anforderungen an die Ableitungen der Werte in Normalenrichtung zum Rand (Neumann-Bedingungen), siehe Ferziger und Peric [2]. Die geometrischen Grenzen, an denen die Randbedingungen gesetzt werden, sind so anzuordnen, dass die Zellenanzahl nicht unnötig maximiert wird und es zu keinen ungewünschten Wechselwirkungen mit den frei gewählten Grenzen (nicht geometrisch erforderlich) kommt. Es wurden die von der ITTC [14] empfohlenen Richtlinien berücksichtigt.

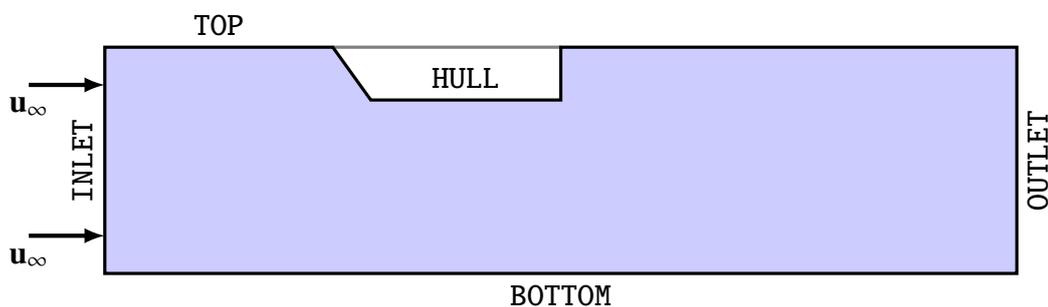


Abb. 3.3: 2D-Skizze des Rechengebietes für Simulationen mit einer Phase.

Grundsätzlich werden sowohl für die einphasigen als auch für die zweiphasigen Simulationen die selben Randbedingungen für die jeweiligen Ränder verwendet. Die Konfiguration für die Simulationen mit nur einer Phase weichen nicht von der Standardkonfiguration, die üblicherweise verwendet wird, ab:

**INLET** Am Einlass wird die Freistromgeschwindigkeit  $u_\infty$  durch eine Dirichlet-Randbedingung vorgegeben, deren Vektor normal auf den Einstromrand steht (siehe Abbildung 3.3). Der Druck ist an diesem Rand unbekannt und wird daher hier durch eine Neumann-Randbedingung beschrieben. Aufgrund des gewählten Turbulenzmodells müssen noch die Ränder zweier weiterer Felder beschrieben werden:  $k$  und  $\omega$ .

Der Vorgabewert beider Felder am Einstromrand wird ebenfalls durch eine Dirichlet-Randbedingung vorgegeben, deren jeweilige Werte nach [11] bestimmt werden.

**OUTLET** Im Gegensatz zum Auslass des Rechengebietes sind hier alle Größen unbekannt und werden daher durch Neumann-Randbedingungen beschrieben [18]. Der Druck muss jedoch an irgendeiner Stelle im Rechengebiet vorgegeben werden, welches an einem vorgegebenen Punkt kurz vor dem Auslass des Rechengebietes geschieht.

**TOP** Bei Simulationen mit nur einer Phase wird die Geometrie auf der Wasserlinie abgeschnitten und eine Symmetriebedingung für alle Felder aufgeprägt.

**HULL** Auf dem Rumpf selber sind alle Komponenten des Geschwindigkeitsvektors 0, was durch eine Dirichlet-Randbedingung abgebildet wird. Der Druck hingegen ist unbekannt und daher wird eine Neumann-Randbedingung verwendet, um Vorgabewerte auf dem Rumpf selber zu erhalten. Die Turbulenzgrößen  $k$  und  $\omega$  werden ebenfalls vorgegeben, allerdings nicht einheitlich für jede Randfläche. Die jeweiligen Werte werden individuell für jede Randfläche berechnet, wozu Wandfunktionen verwendet werden (siehe [2, 12]).

**SIDES, BOTTOM** Die Seiten und der Boden repräsentieren die Tankgeometrie. Um den selben Geschwindigkeitsgradienten zwischen Schiff und Tank zu erhalten, wie es auch im Versuch der Fall war, muss hier die Geschwindigkeit in Schiffslängsrichtung von  $u_\infty$  vorgegeben werden. Alle anderen Größen werden durch Neumann-Randbedingungen beschrieben.

Im Falle einer Simulation mittels Zweiphasen-Transportmodell verschiebt sich der Rechengebietsrand TOP deutlich nach oben und ein zusätzliches Feld muss gelöst werden:  $\alpha$ . Am oberen Rechengebietsrand werden alle Felder mittels Dirichlet-Randbedingungen beschrieben. Am Eintritt werden die Werte für  $\alpha$  vorgegeben, entsprechend der Höhe der freien Oberfläche. An allen anderen Rändern wird auch  $\alpha$  durch Dirichlet-Randbedingungen definiert.

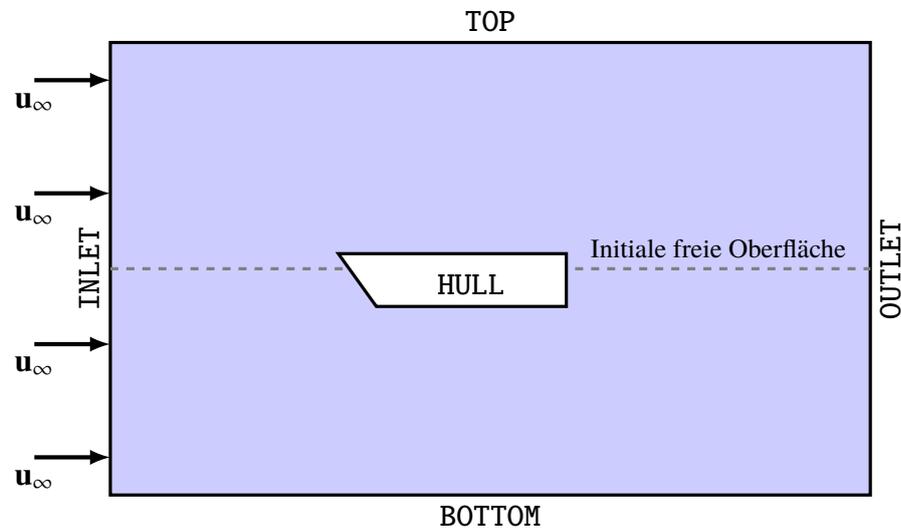


Abb. 3.4: 2D-Skizze des Rechengebietes für Simulationen mit zwei Phasen.

## 3.2 Gittergenerierung

Wie bei FV-Verfahren üblich, muss das Rechengebiet in viele einzelne Kontrollvolumina unterteilt werden. Die verwendeten Strömungslöser im Paket OpenFOAM laufen optimal auf Hexaeder-dominierten Gittern. Für die angestellten Simulationen wurden solche Gitter generiert, jedoch mit Prismenschichten auf den Wänden, um die wandnahe Strömung hinreichend genau auflösen zu können und den Definitionsbereich des verwendeten Turbulenzmodells einzuhalten [12, 16].

Ein Großteil der Simulationen wurde im Modellmaßstab durchgeführt, daher liegt hier der Fokus auf der Gittergenerierung für eben diese Fälle. Trotz der Beschränkung auf den Modellmaßstab, muss eine Vielzahl von verschiedenen Geometrievariationen simuliert werden (siehe Kapitel 5.3.1), was wiederum die Anzahl der benötigten Gitter signifikant erhöht.

Alle verwendeten Rechengitter wurden mit den OpenFOAM-Werkzeugen `snappyHexMesh` und `blockMesh` generiert. Hierzu wird zunächst die Schiffsgeometrie als trianguliertes Oberflächengitter (STL) eingelesen, um die Schiffsposition zu erhalten. Anschließend wird mit einem Python Skript eine Eingabedatei für `blockMesh` erzeugt, wobei lediglich die Anzahl der Zellen vorgegeben wird, die auf die Wassertiefe  $h$  verteilt werden. Um den Schiffsrumpf selber erzeugt `blockMesh` Würfel, was die finale Zellqualität erhöht. Bei allen

Rechengittern, die über Bugstrahlanlagen verfügen, wurden diese extra verfeinert, um die lokale Strömung auflösen zu können.

SnappyHexMesh selber basiert auf sogenannten Octrees und arbeitet mit Verfeinerungsleveln [9]. Dies bedeutet, dass Volumenzellen, basierend auf vom Anwender definierten Kriterien, verfeinert werden können. Jede Verfeinerung erhöht das Verfeinerungslevel der jeweiligen Volumenzelle um 1. Wegen des zugrundeliegenden Octrees (siehe Meagher [10] und Popinet [13]), können nur Hexaeder als Ausgangszellen verwendet werden, da jede Zelle immer in 8 zerteilt wird.

### 3.2.1 Gitter für Einphasenströmungen

Für die Simulationen mit einer Phase wurden Gitter mit 3 verschiedenen räumlichen Auflösungen generiert, um eine Gitterunabhängigkeitsstudie durchführen zu können. Als maßgebliche Eingangsgröße für die Gitterverfeinerung werden die in `snappyHexMesh` eingestellten Verfeinerungslevel nicht verwendet. Anstatt dessen wird die Zelldichte über die Anzahl der Zellen, die auf die Wassertiefe verteilt werden, gesteuert. Dies ist insbesondere für Flachwasserbedingungen wichtig, da so der gesamte Vernetzungsprozess weitestgehend automatisiert werden kann und eine hohe Robustheit besitzt.

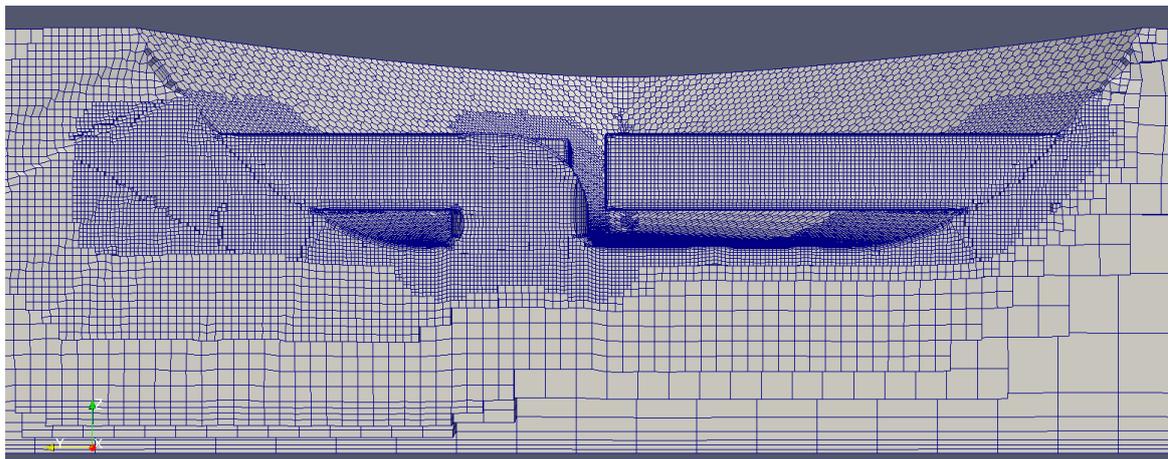


Abb. 3.5: Verfeinerungszone um die Bugstrahlanlage beim feinen Gitter.

Ein Beispiel für die Auflösung des Bereiches um die Bugstrahlanlagen ist in Abbildung 3.5 gezeigt. Je nach Wirkungsrichtung der Bugstrahlanlage ist der Auslass entsprechend verfei-

nert worden, um dortige Effekte räumlich erfassen zu können. Bei den inaktiven Kanälen wurde dieser Bereich nicht explizit verfeinert. Um eine ähnliche räumliche Diskretisierung zu erhalten, wurden die Zellgrößen jedoch identisch gehalten.

Um weiterhin den durch die Bugstrahlanlagen erzeugten Zusatzwiderstand quantifizieren zu können, wurden ebenfalls 3 Gitter für den Rumpf ohne Anhänge erstellt.

Am unteren Rand des Gitters ist die systematische Verfeinerung des Tankbodens zu erkennen, die bei allen Rechengittern für den Schlepptank eingeführt wurde. Durch diese Verfeinerung in  $z$ -Richtung ist es möglich, die wandnahe Strömung am Tankboden, ohne enorm viele zusätzliche Volumenzellen zu generieren, aufzulösen.

Für diesen verwendeten Gittertypen wurde weiterhin eine Gitterstudie für die Widerstandsuntersuchungen durchgeführt. Als variabler Parameter wurde die Zellenzahl in vertikaler Richtung gewählt. Alle weiteren Einstellungen des gesamten Vernetzungsprozesses wurden beibehalten. Die hieraus resultierenden Gitter sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tab. 3.1: Übersicht über die verwendeten Volumengitter für Simulationen mit Einphasenmodell.

Name	Basis	Variante 1		Variante 6		Variante 7	
		BB	Hinten	BB	Hinten	BB	Hinten
grob	$0.753 \cdot 10^6$	$0.906 \cdot 10^6$	$0.910 \cdot 10^6$	$0.884 \cdot 10^6$	$0.909 \cdot 10^6$	5	6
mittel	$1.188 \cdot 10^6$	$1.406 \cdot 10^6$	$1.426 \cdot 10^6$	$1.378 \cdot 10^6$	$1.421 \cdot 10^6$	5	6
fein	$1.682 \cdot 10^6$	$2.015 \cdot 10^6$	$2.030 \cdot 10^6$	$1.969 \cdot 10^6$	$2.030 \cdot 10^6$	5	6

Aufgrund der Asymmetrie des Schiffskörpers wurde das gesamte Schiff vernetzt und keine Symmetrieebene in der Mittschiffsebene ausgenutzt.

### 3.2.2 Gitter für Zweiphasenströmungen

Im Vergleich zu den für Simulationen mit einer Phase verwendeten Gittern, muss bei Rechengittern für Zweiphasenströmungen besonderes Augenmerk auf die Verfeinerung der freien Oberfläche gelegt werden. Je gröber diese aufgelöst wird, desto ungenauer wird das Wellenbild abgebildet. Allerdings führt eine zu feine räumliche Diskretisierung der freien Oberfläche dazu, dass die Rechenzeit soweit zunimmt, dass konvergente Lösungen in keiner akzeptablen Zeit erreicht werden können. Es gilt hier, einen Mittelweg zu finden.

Abbildung 3.6 zeigt die Auslenkung der freien Oberfläche bei  $v_M = 0,972$  m/s und statischer Vertrimmung und Absenkung. Aufgrund der relativ hohen räumlichen Auflösung im Bereich der freien Oberfläche ist das Wellenbild bereits hinreichend genau aufgelöst.

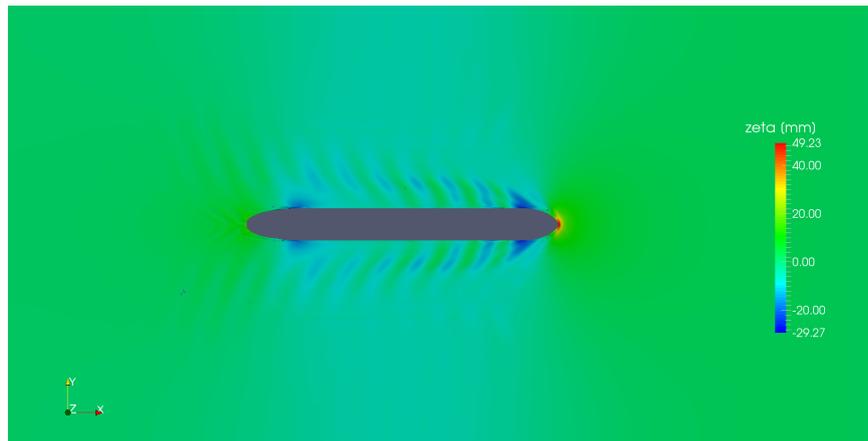


Abb. 3.6: Auslenkung der freien Oberfläche bei  $v_M = 0,972$  m/s und statischer Vertrimmung und Absenkung.

Analog zu den Gittern für Einphasenströmungen wurden für die Zweiphasenströmungen ebenfalls 3 verschiedene Rechengitter generiert, um eine Gitterunabhängige Lösung abschätzen zu können. Hierbei wurden die selben Eingangsdaten wie für die Doppelrumpf-Gitter verwendet, was zu einer - im Rahmen der Möglichkeiten von `snappyHexMesh` - identischen räumlichen Diskretisierung unterhalb der unausgelenkten freien Oberfläche führt.

Tab. 3.2: Übersicht über die Zellzahlen der 3 Rechengitter für Simulationen mit freier Oberfläche.

Name	Volumenzellen
grob	$1.218 \cdot 10^3$
mittel	$3.822 \cdot 10^3$
fein	$6.187 \cdot 10^3$

Aufgrund des größeren zu diskretisierenden Volumens, erhöht sich auch die Anzahl der Kontrollvolumina entsprechend.

### 3.3 Validierungsfälle

Die numerischen Simulationen wurden zunächst in Konfigurationen analog zu den durchgeführten Modellversuchen durchgeführt. Auch wenn die systematischen Untersuchungen teilweise im Maßstab der Großausführung durchgeführt wurden, erfolgte die Validierung zunächst mit der Reynoldszahl des Modells. Während die Bugstrahlanlagen im Versuch vollständig mit der gesamten geometrischen und funktionalen Komplexität der Großausführung abgebildet wurde, erfolgte die Berücksichtigung der Seekästen in Form von Rezessen in der Außenhaut.

#### 3.3.1 Simulation des Seekasten-Rezesses

Wie im Modellversuch, wurde in die Geometrie des Gütermotorschiffes im Maßstab  $\lambda = 16$  an der Backbordseite ein Rezess eingefügt, der in den Abmessungen dem Modellversuch entspricht. Dieser Rezess liegt im Eintrittsbereich des Tunnels am Hinterschiff, welcher im Selbstpropulsionszustand Wasser zum Propeller führt und das Ansaugen von Luft weitgehend verhindert. Das verwendete Oberflächengitter im Bereich des Rezesses ist in Abbildung 3.7 zu sehen.

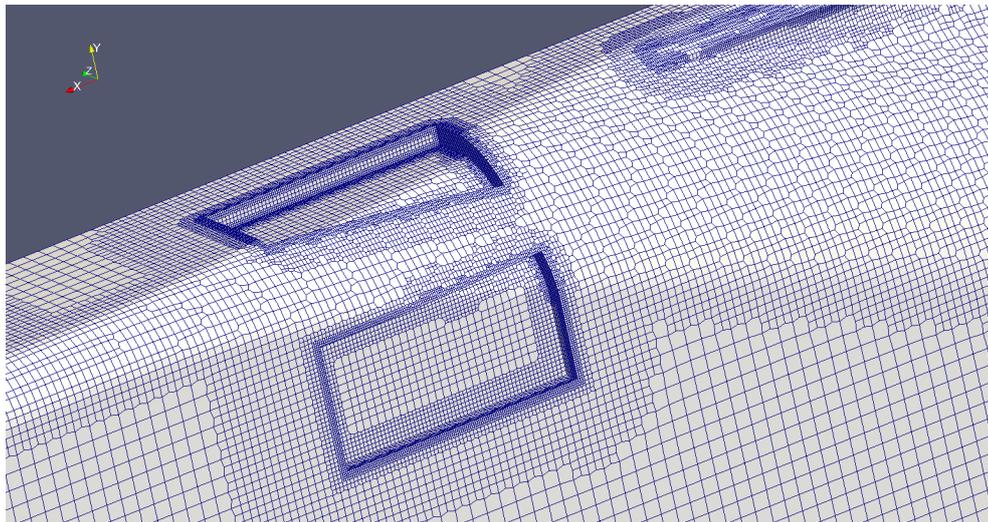


Abb. 3.7: Oberflächengitter in der Simulation im Bereich des Rezesses.

Für eine Modellgeschwindigkeit von 0,833 m/s sind exemplarisch die Isokonturen des Geschwindigkeitsbetrages in den Abbildungen 3.8 bis 3.10 auf Schnittebenen durch das Si-

mulationsgebiet dargestellt. Die betrachtete Schnittebene in den Abbildungen 3.8 und 3.9 wurde so gewählt, dass sie in der Mitte des seitlichen Rezesses liegt. Die Anströmrichtung ist von links nach rechts, d.h. das Heck befindet sich in den Abbildungen auf der rechten Seite. Der Einfluss auf die Geschwindigkeit wird ersichtlich aus Abbildung 3.8. Im der unteren Hälfte der Abbildung (ohne Rezess) bleibt die Strömung anliegend. Im Bereich des Rezesses, in der Abbildung oben, ist eine Beeinflussung deutlich sichtbar.

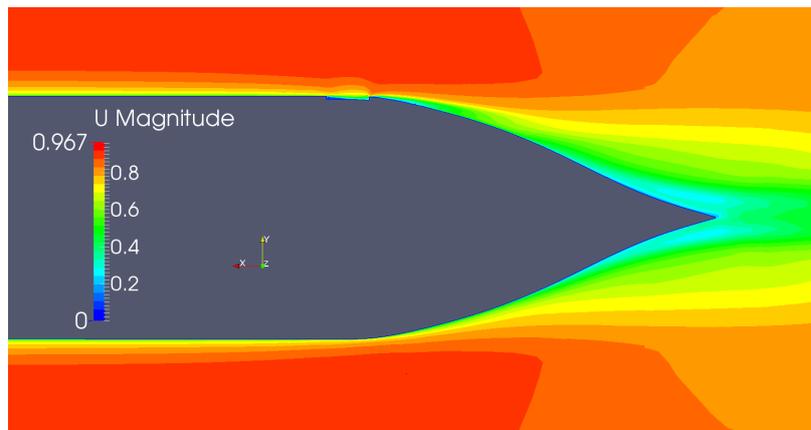


Abb. 3.8: Einfluss des Rezesses auf die Umströmung des Hinterschiffes. Schnittebene mittig im seitlichen Rezess.

Die Abbildung 3.9 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt dieses Bereiches. Von der vorderen Kante des Rezesses zieht sich ein Bereich mit sehr niedriger Geschwindigkeit fast bis zur Mitte hin. Die stromab liegende Kante des Rezesses wirkt versperrend, und die Strömung wird ins Simulationsgebiet gedrückt. Dieser Effekt ist ebenfalls an dem im Schiffsboden eingelassenen Rezess ersichtlich, siehe Abbildung 3.10. Die betrachtete Schnittebene liegt in der Mitte des unteren Rezesses in Längsrichtung des Schiffes. Bei der betrachteten Modellgeschwindigkeit ergab sich eine Differenz von 0,16 N zwischen den Simulationen mit und ohne Rezess. Im Modellversuch lag diese Differenz sogar bei etwa 1 N. In der Simulation wurden weder die Absenkung des Modells noch die freie Oberfläche nicht berücksichtigt, was typischerweise zu einer Unterschätzung des Widerstandes führt. Die im Modellversuch gemessene Seitenkraft betrug 0,33 N. Für die durch den Seekasten erzeugte Querkraft ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Modellversuch.

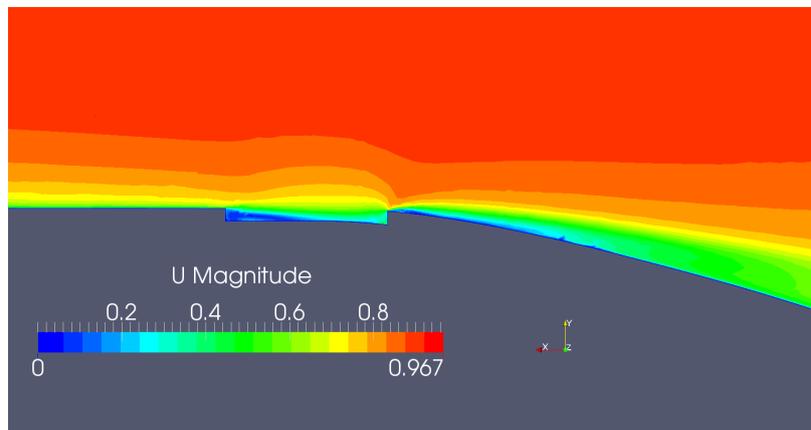


Abb. 3.9: Geschwindigkeitsverteilung an der seitlichen Seekastenöffnung.

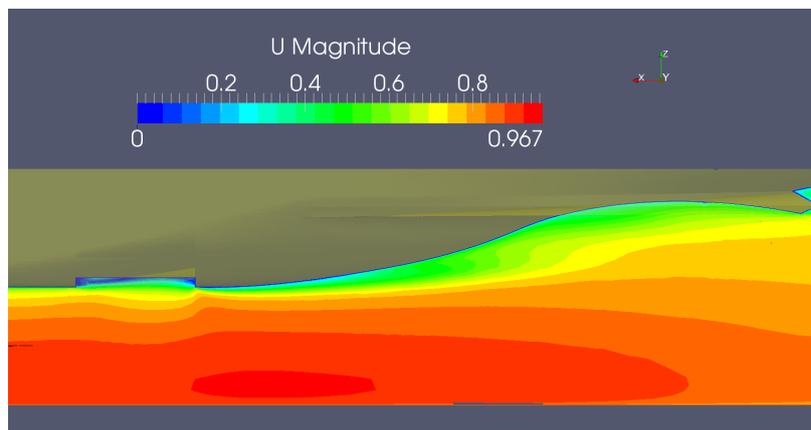


Abb. 3.10: Einfluss des Rezesses auf die Umströmung des Hinterschiffes. Ebene mittig in der Seekastenöffnung am Schiffsboden.

### 3.3.2 Validierung anhand der Modellversuche

Im Ablauf der Modellversuche wurden zuerst Widerstandsversuche mit geschlossenem Rumpf durchgeführt. Danach wurde der Rezess des Seekastens geöffnet. Im Anschluss daran wurden die bis dahin verschlossenen Öffnungen der Bugstrahlruder geöffnet. Die Messungen des Widerstands im Modellversuch mit geöffneten Bugstrahlkanälen beinhalten den geringen Zusatzwiderstand des Rezesses, siehe Abbildung 3.11.

Zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Modells ( $v_M \in [0,556, 0,694, 0,833, 0,972]$  m/s) wurde jeweils eine Simulation für das geschlossene Modell, den geöffneten Rezess und für die geöffneten Bugstrahlruder durchgeführt. Wie erwartet, erhöhen sich die Widerstände

mit zunehmender Geschwindigkeit. Der Unterschied in den Simulationen mit geöffnetem Rezess und dem geschlossenen Modell ist klein, maximal 2% bei der größten Geschwindigkeit. Dieser Unterschied beträgt bei geöffneten Bugstrahlruderanlagen mit geöffnetem Rezess in Summe maximal 11%. Zum Vergleich wurden für die größeren Geschwindigkeiten die Messwerte aus dem Versuch (EFD) eingetragen. Für die Modellgeschwindigkeit von  $v_M = 0,972 \text{ m/s}$  wurden zusätzlich noch Simulationen durchgeführt, die sowohl die freie Oberfläche als auch die dynamische Schwimmlage in Form von Absenkung und Trimm berücksichtigen. Diese Simulationen wurden für drei verschiedene Gitter (siehe Tabelle 3.2) durchgeführt. Jedoch war der mit den verschiedenen Gittern bestimmte Unterschied in den Widerständen vernachlässigbar klein, so dass in Abbildung 3.11 nur das Ergebnis des groben Gitters gezeigt wird.

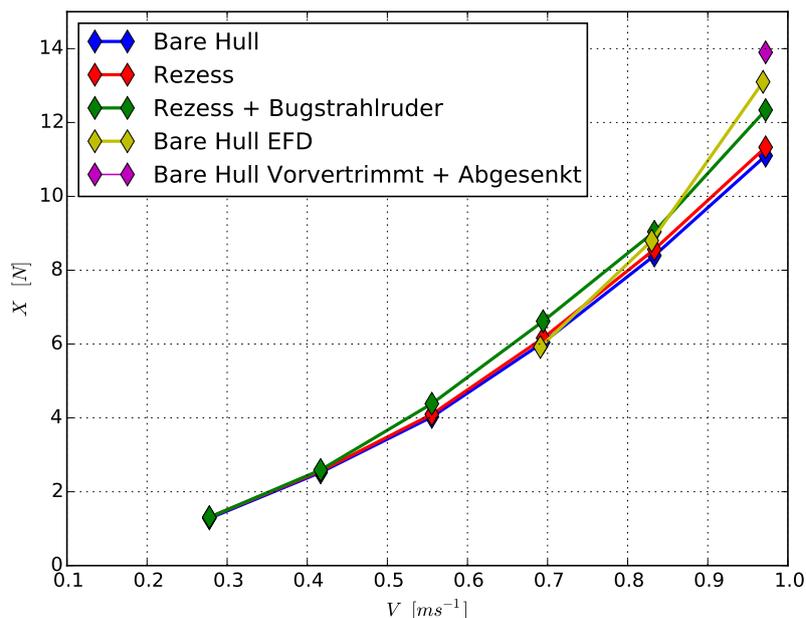


Abb. 3.11: Vergleich des Widerstands in der Simulation für die Geometrien aus den Modellversuchen.

Die benötigte Rechenzeit ist für das notwendige Zweiphasenmodell dennoch sehr groß, was diese Art der Simulationen teuer macht. Bei einer Geschwindigkeit von  $0,972 \text{ m/s}$  ist die Differenz zu den numerischen Simulationen recht groß, da der Wellenwiderstand sowie Absenkung und Trimm numerisch nicht berücksichtigt wurden. Einzig die Simulation mit freier Oberfläche (magenta in Abbildung 3.11) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Mes-

sungen. Insgesamt geben die numerischen Simulationen die physikalischen Abhängigkeiten gut wieder.

Das Wellenbild aus der gezeigten Rechnung mit freier Oberfläche und berücksichtigter Vertrimmung und Absenkung ist in Abbildung 3.6 auf Seite 45 gezeigt. Die obere und untere Grenze des Rechengebietes ist als reibungsbehaftete Wand definiert, entsprechend der Physik im Modellversuch. Gut zu erkennen ist die Absenkung der freien Oberfläche neben dem Schiffsrumpf.

### 3.3.3 Numerische Untersuchung an einem Bugstrahlruder

Für die Validierung der gewählten Ansätze für die Bugstrahlanlagen wurden Konfigurationen ohne Vorausschwindigkeit, so genannte Pfahlzugbedingungen, gewählt. In der numerischen Simulation wurden die Kanäle und Durchdringungen des Rumpfes durch die Bugstrahlruder detailliert geometrisch modelliert. Dieser Teil entspricht exakt der im Modellversuch untersuchten Geometrie. Der einzige Unterschied zum Modellversuch ist die Realisierung des Impellers, welcher im Modellversuch durch einen Propeller repräsentiert war. In der numerischen Simulation ist eine Modellierung dieser Rotoren auf verschiedenen Komplexitätsebenen möglich.

1. Modellierung als Volumenkraftmodell, ohne geometrische Berücksichtigung des Propellers. Es wird lediglich dessen Wirkung auf das umgebende Fluid durch Volumenkräfte auf der rechten Seite der Impulsgleichung modelliert.
2. Modellierung als “stationäre” Rotation, durch Aufbringen von Corioliskräften auf die Propeller-Oberfläche. Der Propeller selber rotiert jedoch nicht geometrisch.
3. Modellierung mittels “sliding-interface”. Hier wird der Propeller separat vernetzt und rotiert geometrisch. Der maximal wählbare Zeitschritt ist hier jedoch stark beschränkt, da der Impeller maximal  $5^\circ$  pro Zeitschritt rotieren sollte. Ansonsten wird die Simulation instabil und konvergiert häufig nicht.

Aufgrund des Umfangs der Geometrievariationen wurde die erste Variante gewählt, da sie sowohl den Vernetzungsaufwand als auch die Rechenzeit bei guter Abbildung der Strömungswirkung begrenzt. Die “sliding-interface” Variante hingegen ist sehr rechenzeitintensiv und konnte aufgrund dieser Eigenschaft nicht sinnvoll im Projekt eingesetzt werden. Um eine

ausreichend feine Auflösung der Geometrie und des Volumens der Propellerscheibe zu erreichen, wurden entsprechende Verfeinerungsregionen verwendet (siehe Abbildung 3.12).

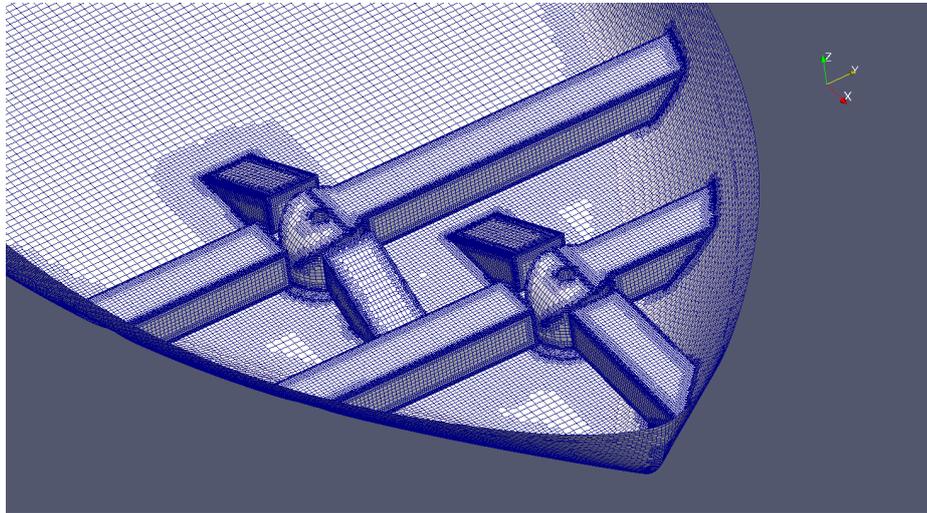


Abb. 3.12: Geometrie und Oberflächengitter der Bugstrahlanlagen.

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, ist die einzig relevante Eingangsgröße des Volumenstrommodells der integrale Schub. Es gibt weitere Größen, die jedoch nur zum Ausrichten der Propellerscheibe im dreidimensionalen Raum und für andere generelle Einstellungen notwendig sind.

Zu unterschiedlichen Drehzahlen des Impellers im Modellversuch wurde der dazu im Modellversuch gemessene Schub im Bugstrahlruder als Eingangsschub für das Volumenstrommodell aufgebracht. Nach vollendeter Simulation wurde die resultierende Seitenkraft auf das Modell mit der gemessenen Seitenkraft verglichen (siehe Abbildung 3.16).

Um Maßstabeffekte ausschließen zu können, wurden die numerischen Simulationen im selben Maßstab (1:16) wie die Modellversuche durchgeführt. Weiterhin ist die Breite des Rechengebietes vom Flachwassertank des DST und die Querposition des Modells aus dem Modellversuch übernommen worden. Bei den Pfahlzuguntersuchungen der Bugstrahlanlage wurde zu jeder Propellerdrehzahl eine separate Simulation mit dem jeweiligen Schub aus der entsprechenden Messung durchgeführt.

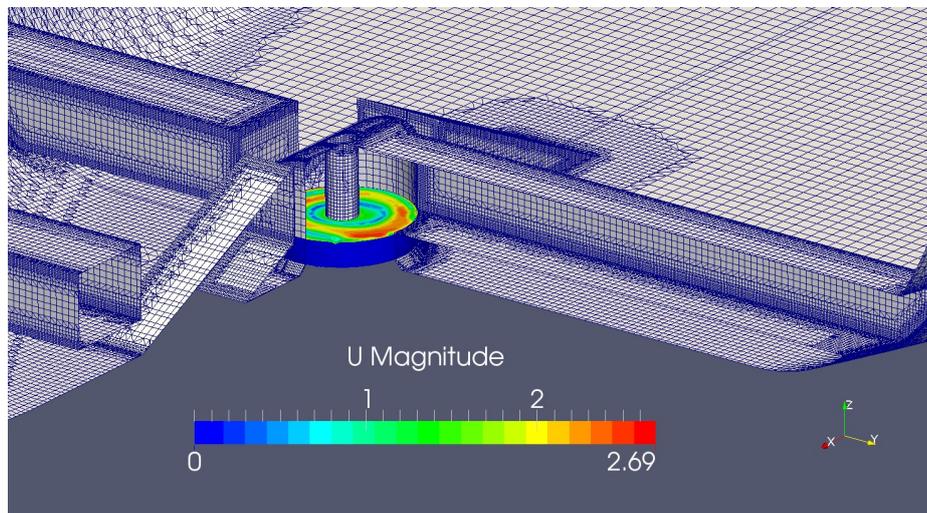


Abb. 3.13: Teil des Volumengitters, auf dem das Volumenkraftmodell wirkt.

Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse für die Bugstrahlrunderanordnung an Steuerbord mit Abstrahlrichtung Backbord verwendet. Ein Schnitt durch den Auslass und die Impellerebene ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Dort wird der Geschwindigkeitsbetrag in der Impellerebene farblich gezeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass es eine stark inhomogene Geschwindigkeitsverteilung gibt. Der Betrag der Geschwindigkeit ist am Innenradius deutlich höher als am Außenradius der Krümmung zwischen Ein- und Auslass. Dies ist unter anderem auf die Versperrung des Kanals, die durch die Impellerwelle erzeugt wird, zurückzuführen.

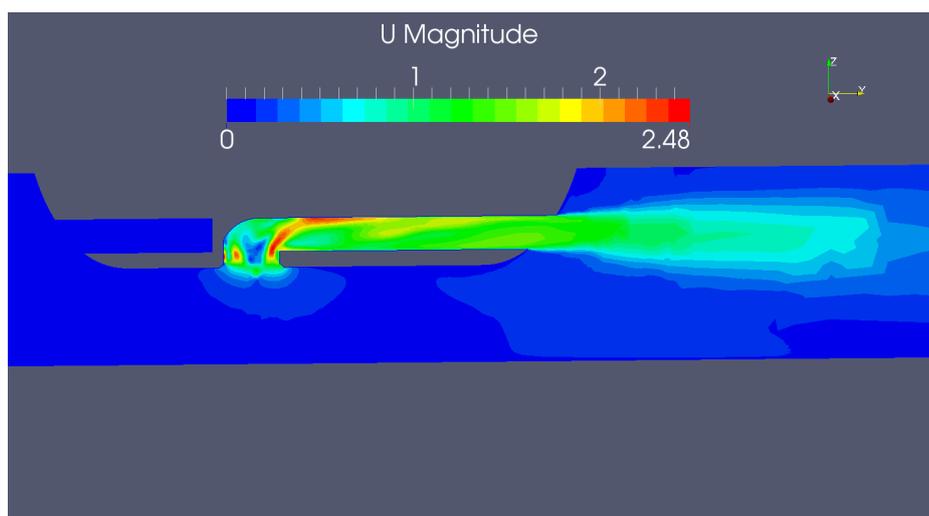


Abb. 3.14: Isoflächen des Geschwindigkeitsbetrags im Austrittskanal des Bugstrahlruders.

Abbildung 3.14 zeigt ebenfalls den Betrag der Geschwindigkeit, allerdings in einem Querschnitt des Kanals, dessen Normalenrichtung der Schiffslängsrichtung entspricht. Hier ist der Strahl gut zu erkennen, der über den inneren Radius des Ansaugrohres strömt und dann gegen die Oberseite des Austrittskanals trifft.

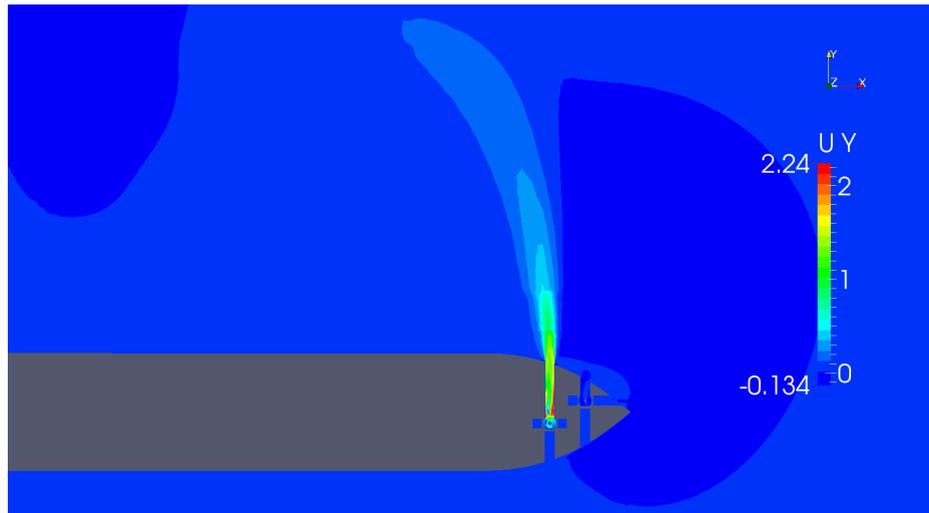


Abb. 3.15: Isoflächen der Geschwindigkeitskomponente in Richtung des Austrittskanals im Simulationsgebiet.

Die folgenden Abbildungen beziehen sich auf eine Simulation, die einer Propellerdrehzahl im Bugstrahlruder von  $25 \frac{1}{s}$  entspricht. In Abbildung 3.14 ist die Geschwindigkeitsverteilung des Betrags des Geschwindigkeitsvektors innerhalb der Bustrahlruderkanäle dargestellt. Im Bereich der Propellerscheibe, auf der das Volumenkraftmodell angewendet wird, erfährt die Strömung eine starke Beschleunigung, wird im Anschluss daran umgelenkt und tritt dann aus dem Bugstrahlruder aus. Der Nachstrom der Bugstrahlanlage wird weit in das umgebende Fluid transportiert, wie in Abbildung 3.15 zu sehen ist. Hier wird nur die Querkomponente der Geschwindigkeit farblich dargestellt, jedoch ist gut zu erkennen, dass ein Effekt immer noch nach 2-3 Schiffsbreiten zu bemerken ist. Durch die minimale Anströmgeschwindigkeit, die aus numerischen Gründen notwendig ist und  $0,05 \text{ m/s}$  beträgt, wird der Strahl leicht entlang des Rumpfes nach achtern abgelenkt.

Abbildung 3.16 zeigt einen Vergleich zwischen den im Experiment gemessenen und mittels numerischer Simulationen berechneten Querkräften  $Y$ . Wie zu sehen ist, ist die Übereinstimmung über den gesamten Messbereich sehr gut. Sobald die Impellerdrehzahl  $n$  eine

Drehzahl von 22/s überschreitet, wird im Modellversuch bzw. in der numerischen Simulation, eine Seitenkraft generiert, die auf die Großausführung umgerechnet die in [20] für diese Schiffsabmessungen festgelegten 18 kN überschreitet.

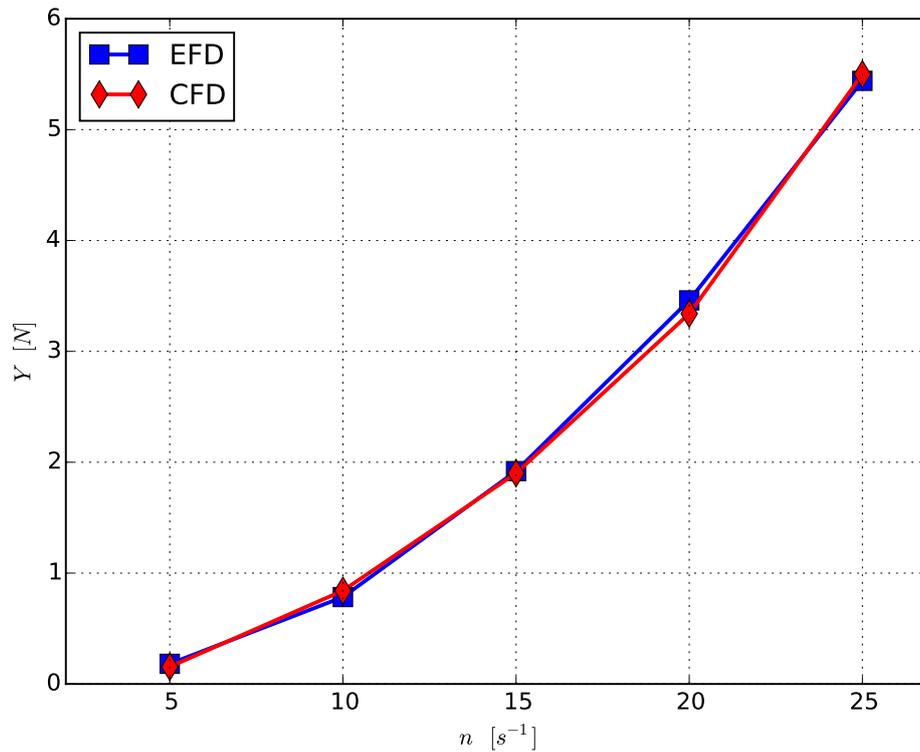


Abb. 3.16: Gemessene und berechnete Seitenkraft im Pfahlzug des Steuerbord-Bugstrahlruders, bei Abstrahlrichtung nach Backbord.

## 4 Modellbildung

Da alle bisherigen numerischen Untersuchungen bereits mit dem Open Source Softwarepaket OpenFOAM durchgeführt wurden, wurde diese Software ebenfalls für die Modellbildung der Zusatzmodelle verwendet. Der große Vorteil von freier Software ist, dass sie beliebig erweitert werden kann, da Änderungen nicht über vom Hersteller vorgegebene APIs erfolgt, sondern man direkt in die vorhandenen Klassenhierarchien eingreifen kann.

Wenngleich sich diese Art der Entwicklung relativ einfach und zugänglich anhört, liegt eines der größten Probleme in diesem Kontext darin, die korrekten Stellen der Klassenhierarchien von OpenFOAM zu identifizieren und korrekt zu verwenden. Hierzu bedarf es zum einen solider Programmierkenntnisse in C++ sowie eines geschulten Umgangs mit Entwurfsmustern. Andernfalls werden die zu tätigen Entwicklungen nicht allgemeingültig implementiert und deshalb nur für einige wenige Fälle von Nutzen sein.

Zweierlei Kategorien von Modellen sind im Rahmen dieses Projektes zu entwickeln, bzw. in OpenFOAM zu implementieren. Einerseits muss ein geeignetes Volumenkraftmodell ausgewählt und an entsprechender Stelle implementiert werden, um den Impeller der Bugstrahlanlagen zu modellieren. Andererseits sollen Ersatzmodelle für den Seekasten bzw. Rezess und die Bugstrahlanlagen gefunden werden.

### 4.1 Bugstrahl Impeller

Wie bereits in Kapitel 2.5 beschrieben, soll die Wirkung des Impellers der Bugstrahlanlage durch ein entsprechendes Volumenkraftmodell modelliert werden. Die Grundlagen des mathematischen Modells wurden bereits in Kapitel 2.5 ausgiebig dargelegt. An dieser Stelle soll die Implementierung kurz erläutert werden.

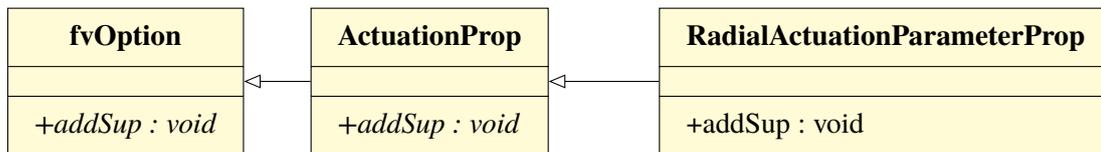


Abb. 4.1: Klassendiagramm fvOptions

Abbildung 4.1 zeigt ein stark vereinfachtes UML-Diagramm der Klassenhierarchie von `fvOption`, welche als Basisklasse verwendet wird, um neue Quellterme in OpenFOAM zu implementieren. Diese Basisklasse übernimmt die gesamte Kommunikation mit den Eingabedateien sowie der Simulation. Einzige Art und Weise, wie die Quellterme bestimmt werden, muss noch vom Benutzer implementiert werden.

Die Zellen, in denen die Volumenkräfte aufgebracht werden sollen, werden mittels dem Werkzeug `topoSet` ausgewählt und in einem `cellSet` gespeichert. Mit Hilfe des anzugebenden Ursprungs, Radius und Richtung des Schubes werden dann während der Laufzeit nur die Zellen aus dem `cellSet` verwendet, die wirklich auf dem Propeller liegen. So ist es möglich, diese geometrische Überprüfung auf einen Bruchteil der gesamten Volumenzellen zu reduzieren, was sich sehr positiv auf die Laufzeit auswirkt. Basierend auf der im Rahmen dieses Projektes nicht verwendeten Gitterbewegung, wird diese Auswahl nur einmal zur Konstruktionszeit der Volumenkräfte – also zu Beginn der Simulation – durchgeführt. Bei Gitterbewegungen müsste dies optimalerweise in jedem Zeitschritt überprüft werden.

## 4.2 Ersatzmodell für Bugstrahlanlagen

Um die geometrische Modellierung der Bugstrahlanlagen zu umgehen, wurde ein Ersatzmodell entwickelt, welches auf speziellen Dirichlet-Randbedingungen basiert. Dazu wurde der Bereich, in dem die Strömung durch einen Impeller beschleunigt und im Anschluss umgelenkt wird, nicht berücksichtigt, wodurch die geometrische Beschreibung deutlich vereinfacht wurde. Im Bereich der Strömungsumlenkung existiert innerhalb der Bugstrahlkanäle ein Bereich mit höherem Druck, der zu einem Kraftanteil entgegen der Abstrahlrichtung des Bugstrahlruders führt. Dieser Anteil ist nun nicht mehr in der Simulationen enthalten und muss im neuen Modell berücksichtigt werden.

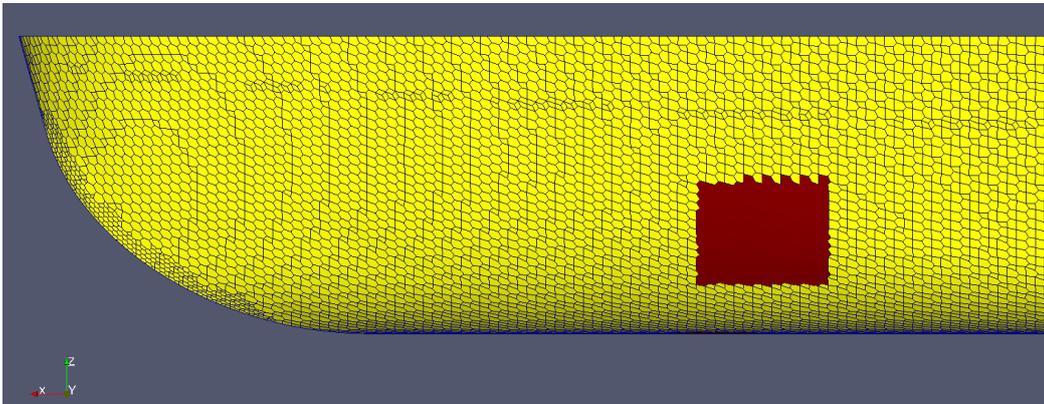


Abb. 4.2: Nachträglich selektierte Ränder für den Auslasskanal.

Als Basis der Modellierung werden Flächen definiert, welche als Ein- und Austritt in das Simulationsgebiet dienen sollen. Diese müssen nicht geometrisch berücksichtigt werden, sondern können mit dem Werkzeug `topoSet` selektiert werden. Mittels `topoSet` werden z. B. für den Auslass die Volumenzellen um den Auslass herum ausgewählt, und diese Menge wird danach auf die Randflächen des Volumengitters reduziert, welche ein `faceSet` bilden. Randflächen sind in OpenFOAM all die Zellseitenflächen, die keine Nachbarn haben. Die selektierten Flächen in diesem `faceSet` sind in Abbildung 4.2 rot dargestellt. Damit diese Flächen für OpenFOAM als Randbedingung handelbar sind, muss ein Patch, ein Basisdatentyp für Randbedingungen, erzeugt werden. Aus dem mit `topoSet` erzeugten `faceSet` wird, unter Anwendung des OpenFOAM eigenen Werkzeuges `createPatch`, ein Patch erstellt. Die Sicht auf das Oberflächengitter des Modells, Abbildung 4.2, wurde so gewählt, dass die in diesem Fall ausgewählte rechteckige Form des Bugstrahlkanals erkennbar ist. Diese projizierte Fläche  $A_{p,e}$ , denn die betrachtete Fläche liegt in einem gekrümmten Bereich des Buges, Abbildung 4.3, wird für die Eintrittsbedingung, der Auslassöffnung des Bugstrahlruders, in das Simulationsgebiet genutzt.

Die dunkelrot eingefärbte Fläche  $A_{p,a}$  in der Abbildung ist der Bereich, in dem das Bugstrahlruder Wasser mit einer Geschwindigkeit  $v_a$  ansaugt. Über diese Fläche tritt ein Massenstrom aus dem Simulationsgebiet heraus, welcher von gleicher Größe sein muss wie der über die Eintrittsfläche in das Simulationsgebiet eintretende, dies bedeutet  $\rho v_e A_{p,e} = \rho v_a A_{p,a}$ . Für beide Flächen wurde deshalb eine gekoppelte Randbedingung in OpenFOAM implementiert. Beide Randbedingungen wurden von der Basisklasse `fixedValueFvPatchField` abgeleitet. Diese Basisklasse beinhaltet eine Dirichlet-Randbedingung für Skalare, Vektoren und Matri-

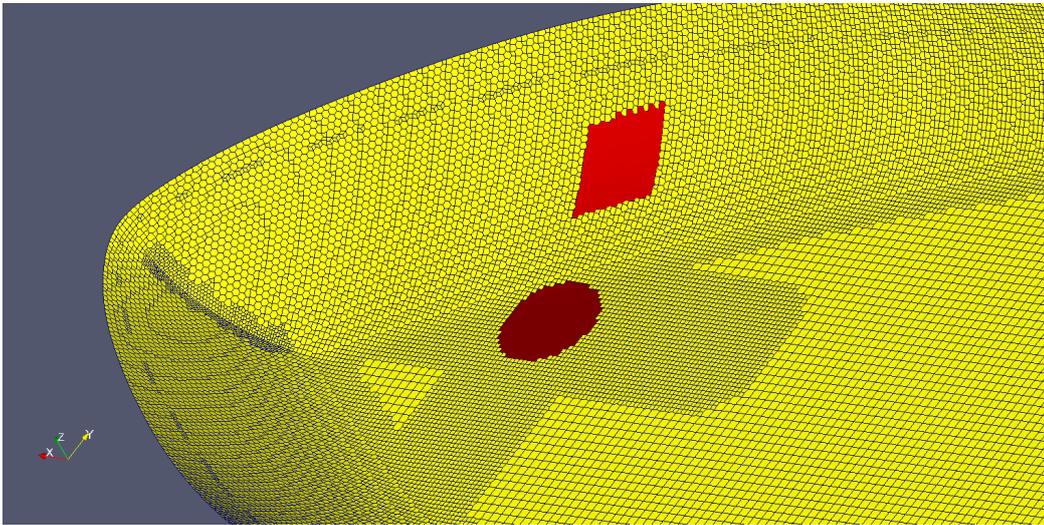


Abb. 4.3: Nachträglich selektierte Ränder für den Ein- und Auslass.

zen. Die gesamte Funktionalität wird in der `updateCoeffs` Methode implementiert, die von den jeweiligen Lösern an entsprechender Stelle aufgerufen wird. Abbildung 4.4 beinhaltet einen Ausschnitt aus der Textdatei, die zur Steuerung der Randbedingungen in OpenFOAM benötigt wird. Für den Patch `HULL_bbthrusterout`, die rote Fläche in Abbildung 4.3, werden ein Geschwindigkeitsbetrag und ein Richtungsvektor `direction` vorgegeben. Der Betrag der Geschwindigkeit ist abhängig vom jeweiligen Patch `HULL_thrusterin` (dunkelrote Fläche), dessen Geschwindigkeitsvektor in Richtung `coupled_direction` vorgegeben ist.

Wie vorher in diesem Abschnitt erwähnt, wurde mit der Entfernung der Geometrie ein Anteil der erzeugten Querkraft aus der Simulation herausgelöst. Denn der Prozess des Ausströmens, d.h. dem Eintritt ins Simulationsgebiet, erfolgt gegen den umgebenden Druck, welcher sich gegenüber der detaillierten Simulation nicht wesentlich ändern wird.

In das Simulationsgebiet wird mit der Geschwindigkeit  $v_e$  ein Massenstrom  $\dot{m}$  über die Fläche eingebracht. Dadurch wird ein Impuls in das Simulationsgebiet eingebracht, welcher einer Querkraft  $Q$  entspricht.

$$\dot{m}\vec{d} = \rho A_{p,e} v_e^2 = Q$$

Des Weiteren wird über eindimensionale reibungsfreie Ansätze ein Bezug zum vertikal einzubringenden Impellerschub, Variable `$bthrust` in Abbildung 4.4, hergestellt. Dieser Ansatz erfolgte, damit die Impellerschübe mit dem Volumenkraftmodell verglichen werden können. Der Impellerschub ist eine schwer zugängliche Größe und kann nach Kennlinien des

```
boundaryField{
  HULL_bbthrusterout
  {
    type                coupledSimpleThrusterVelocity;
    coupledPatch        "HULL_thrusterin";
    value               uniform ($ux 0 0);
    direction           (0 1 0);
    coupled_direction   (0 0 1);
    thrust              $bsthrust;
  }
  HULL_thrusterin
  {
    type                SimpleThrusterVelocity;
    coupledPatch        "HULL_thrusterbbout";
    value               uniform ($ux 0 0);
    direction           (0 0 1);
    coupled_direction   (0 1 0);
    thrust              $bsthrust;
  }
  ....
}
```

Abb. 4.4: Ausschnitt aus der Datei für die Randbedingungen der Geschwindigkeit

Anlagenherstellers oder unter Zuhilfenahme einer zum Impeller gehörenden Propellerfreifahrt, in dieser sind Schubbeiwert  $K_T$  und Momentenbeiwert  $K_Q$  über dem Fortschrittsgrad  $J$  abgetragen, abgeschätzt werden.

In den Modellversuchen mit aktivem Bugstrahlruder zeigte sich, dass die gemessene vertikale Kraft auf die Impellerachse und das gemessene Moment mit den Daten aus der zugehörigen Propellerfreifahrt bei einem Fortschrittsgrad von 0, also einer Anströmgeschwindigkeit von  $v_\infty = 0$  m/s gut übereinstimmten. Im Fall des aktiven Bugstrahlruders ist  $v_\infty$  wegen der vertikalen Ausrichtung des Impellers nahezu Null. Dies zeigt sich bei Modellgeschwindigkeiten bis 0,621 m/s, denn die Abweichung, sowohl für den Schubbeiwert als auch für den Momentenbeiwert, betrug im Maximum unter 10%. Aus dem Momentenbeiwert kann über die Drehleistung und die Herstellerangaben des Bugstrahlruders auf die in das vereinfachte Modell einzusetzenden Werte für den Impellerschub geschlossen werden.

# 5 Numerische Simulationen

## 5.1 Seekasten in der Großausführung

Modellversuche werden unter Froude'scher Ähnlichkeit ausgeführt, das bedeutet, die Wellenausbreitung im Modellversuch der Wellenausbreitung in der Großausführung geometrisch ähnlich ist. Dadurch ist die Reynoldszahl im Modellversuch kleiner als für die Großausführung, d.h. die Viskosität ist im Modellversuch größer. Dieser Maßstabeffekt ist der Grund, weshalb auf Modellversuche basierende Prognosen für die Großausführung, mit Hilfe spezieller Verfahren extrapoliert werden. Gerade bei den kleinen Öffnungen des Grätings spielt die Viskosität eine große Rolle, so dass die Simulationen für die Seekästen in Großausführung durchgeführt wurden. Für die Gittergenerierung bedeutet dies, dass die Grenzschicht räumlich feiner aufgelöst werden muss, da die Grenzschicht für die Großausführung wesentlich dünner ist, als im Modellversuch.

### 5.1.1 Simulation eines detaillierten Seekastens

In Anlehnung an die Modellversuche wurden Simulationen zu einem Seekasten durchgeführt, der ähnlich positioniert ist wie der Rezens im Modellversuch. Seekästen sind häufig sowohl backbord als auch steuerbord angebracht, so dass eine symmetrische Geometrie erzeugt wurde. Des Weiteren wurde ein Grätting wie für die Großausführung verwendet, siehe Abbildung 5.1. In dem Seekasten wäre noch ein Wärmetauscher enthalten, über den die eigentliche Kühlung der Hauptmaschine stattfindet. Der im Seekasten enthaltene Wärmetauscher und der Einfluss der Temperatur wurden nicht berücksichtigt, da die passive Durchströmung des Seekastens im Vordergrund steht.

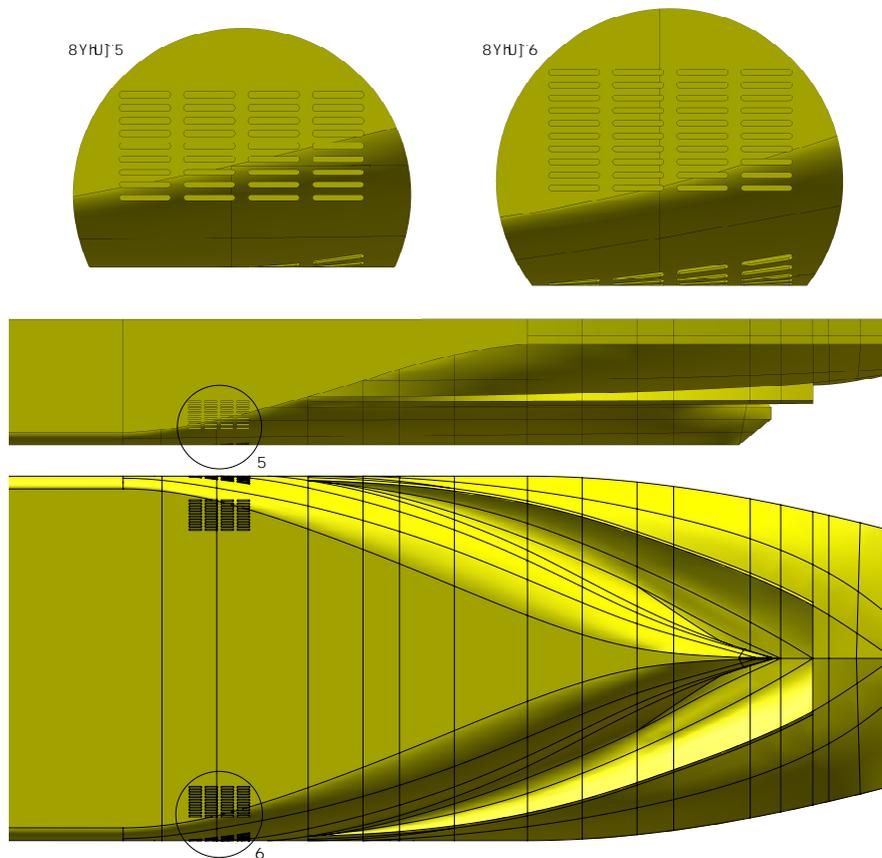


Abb. 5.1: Beidseitiger Seekasten mit Grätting. Die Form des Grättings ist in den Detailzeichnungen A und B detailliert dargestellt.

Das Innere des Seekastens gehört mit zum Simulationsgebiet und ist über die Schlitze des Grättings mit dem äußeren Simulationsgebiet verbunden. Zudem ist die Außenhaut sehr dünn, weshalb dieser Übergangsbereich sehr fein aufgelöst werden muss, damit die Geometrie ordentlich abgebildet werden kann. Das in der Simulation verwendete Oberflächengitter im Bereiches des Seekastens ist in Abbildung 5.2 abgebildet und gibt einen Eindruck über die sehr unterschiedlichen Größenverhältnisse der Oberflächendiskretisierung.

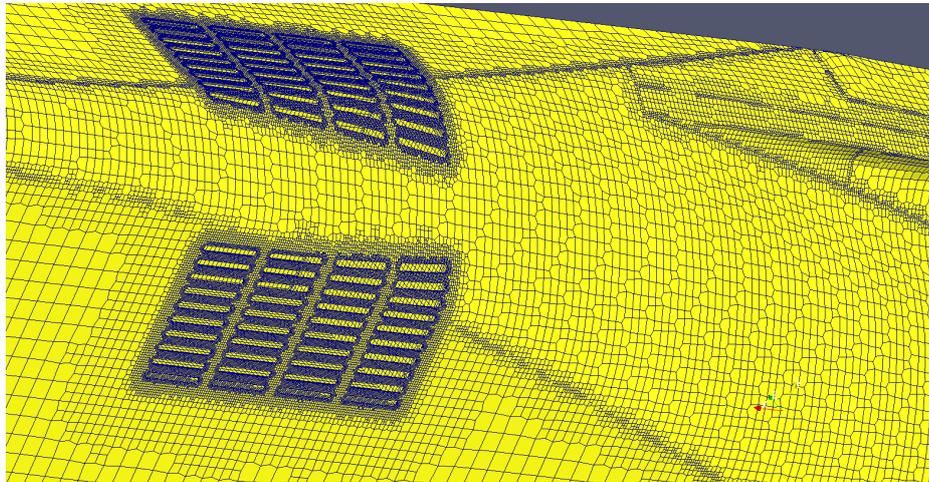


Abb. 5.2: Oberflächengitter des Seekastens mit Grätting.

In Abbildung 5.3 sind die Isokonturen des Druckes im Bereich des backbord Seekastens für eine Schiffsgeschwindigkeit von 14 km/h dargestellt. Auf den Innenkanten des Grättings sind lokale Druckmaxima ersichtlich (rote Flächen im Grätting), welche auf eine Verzögerung oder Umlenkung des Fluids hindeuten. Zur gezielten Betrachtung der Strömungsrichtung wurde eine Schnittebene zwischen der seitlichen Schiffshaut und dem Inneren des Seekastens mit Isokonturen der Querkomponente ( $U_y$ ) der Geschwindigkeit eingefärbt, Abbildung 5.4. Die Anströmung erfolgt von rechts nach links, also in positiver  $x$ -Richtung. An den Öffnungen des Grättings strömt es auf der linken Seite (roter Bereich) in den Seekasten hinein. An den Öffnungen ganz links strömt es jedoch aus dem Seekasten hinaus (blauer Bereich). Eine ähnliche Schnittebene, zwischen innerem Seekasten und Schiffsboden, wurde für die vertikale Geschwindigkeitskomponente mit Isokonturen dargestellt, Abbildung 5.5. Hier ist die Anströmrichtung von links nach rechts. Auch hier strömt es an einer Seite der Öffnungen, rechte Seite, hauptsächlich ein und an der anderen Seite, mit kleinerer Geschwindigkeit aus.

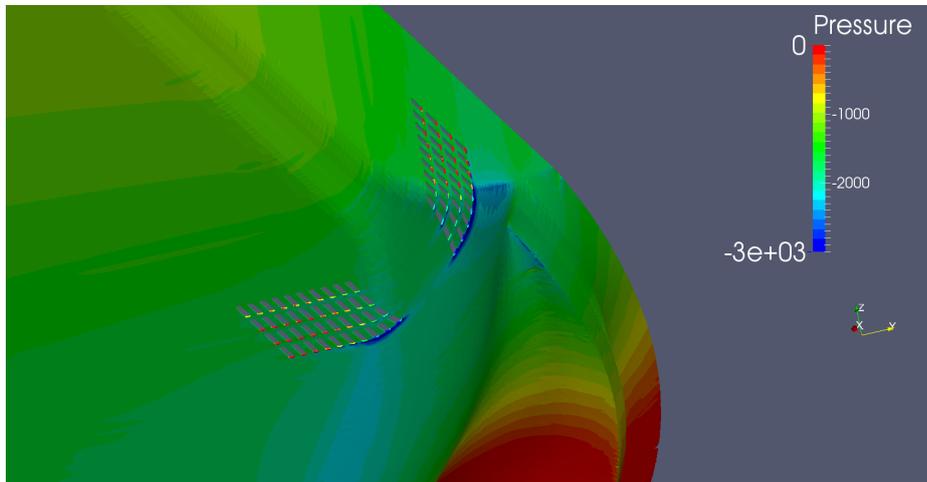


Abb. 5.3: Isokonturen des Druckes im Bereich des Seekastens. Die Anströmung erfolgt in positive  $x$ -Richtung. Ansicht von schräg unten auf des Heck des GMS.

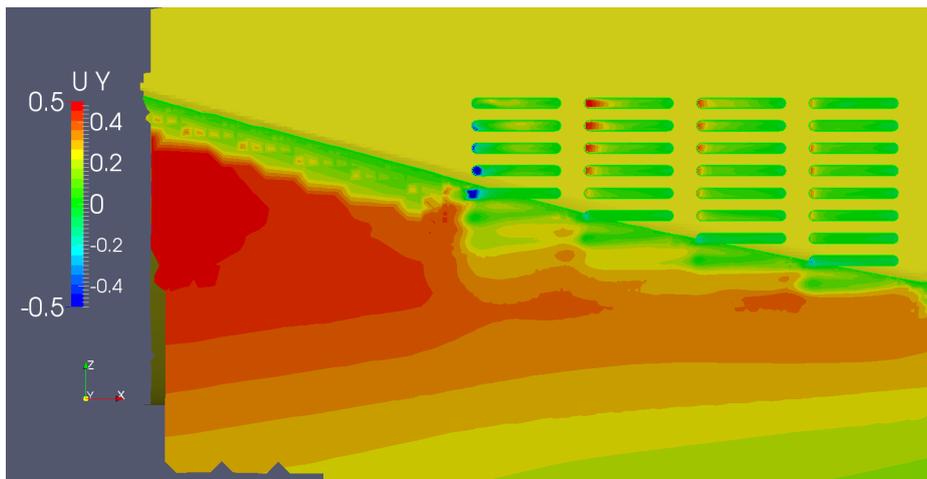


Abb. 5.4: Geschwindigkeitskomponente quer zur Anströmung auf einer Schnittebene zwischen Rumpf und Grating der seitlichen Seekasten Öffnung. Die Anströmung erfolgt von links nach rechts, in positive  $x$ -Richtung.

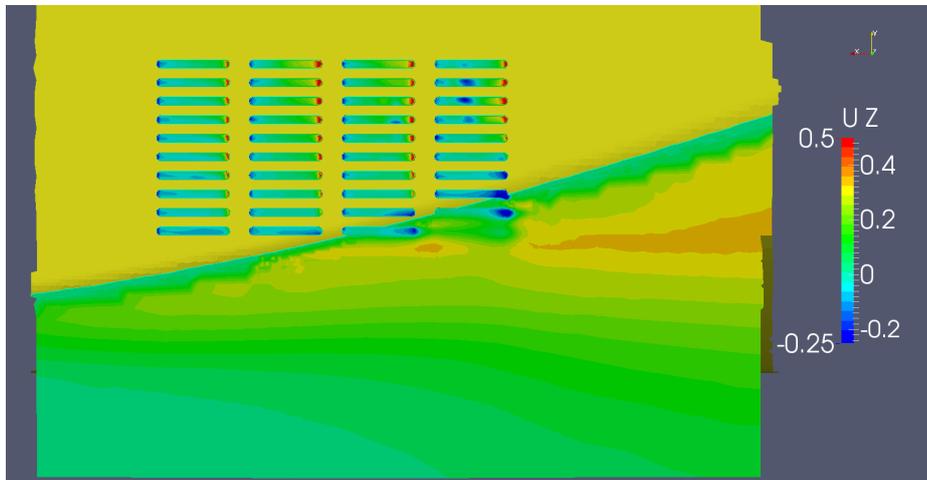


Abb. 5.5: Vertikale Geschwindigkeitskomponente auf einer Schnittebene zwischen Rumpf und dem Grätting am Schiffsboden.

Zusätzlich sind in Abbildungen 5.6 bis 5.8 Stromlinien dargestellt. Je 100 Stromlinien beginnen quer verteilt über die Breite der Grättingschlitzte. Bezogen auf Abbildung 5.5 sind dies die zweite, dritte und vierte Reihe von links. Die jeweilig linken Abbildungen visualisieren durch die gezeigten Stromlinien, woher das Fluid geströmt kommt und die jeweilig rechten Abbildungen zeigen wohin es strömt. Abbildung 5.6 zeigt die Komplexität der Strömung innerhalb des Seekastens. Ausgehend von der Startlinie erreichen die Stromlinien fast den gesamten inneren Bereich des Seekastens. Der Seekasten wird unter den gewählten Bedingungen also gut durchströmt, auch wenn einige Bereiche sehr kleine Geschwindigkeitsbeträge vorweisen. Es existieren Bereiche, in denen fließt das Wasser am Schiffsboden ein und tritt über das seitliche Grätting aus, Abbildung 5.7. Dies erfolgt aber ebenso in umgekehrter Reihenfolge, Abbildung 5.8.

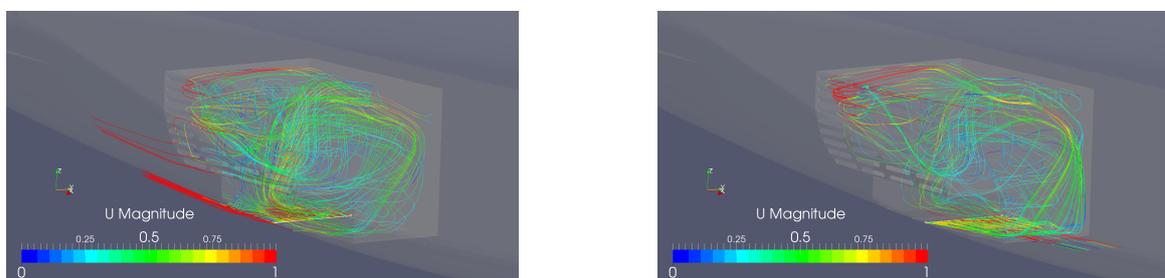


Abb. 5.6: Stromlinien im Seekasten. Startlinie am Schiffsboden auf der Mitte der Zweiten Reihe von Öffnungen.

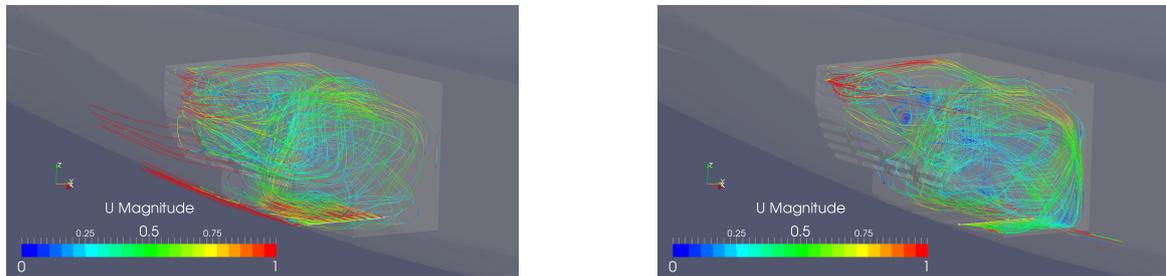


Abb. 5.7: Stromlinien im Seekasten. Startlinie am Schiffsboden auf der Mitte der Dritten Reihe von Öffnungen.

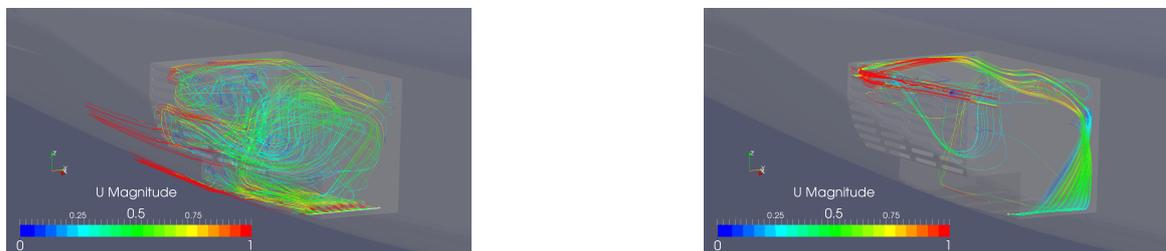


Abb. 5.8: Stromlinien im Seekasten. Startlinie am Schiffsboden auf der Mitte der Vierten Reihe von Öffnungen.

Unter den betrachteten Bedingungen wird der Seekasten gut durchströmt. Es ist jedoch kaum möglich Bereiche zu identifizieren, in denen eine starke Trennung zwischen Ein- und Ausströmen vorliegt. Dies macht eine vereinfachende Modellierung schwierig.

### 5.1.2 Simulation eines Seekastens asymmetrisch im Schiffsboden

Eine weitere Form des Seekastens ist eine Öffnung im Schiffsboden versehen mit einem Grätting. Links in Abbildung 5.9 ist das Oberflächengitter des Hinterschiffes zu sehen. Die Ansicht ist von schräg unten auf den Schiffsboden, wobei ein Teil des Schiffsboden ausgeblendet ist, damit die asymmetrische Position des Seekastens erkennbar ist. Im rechten Teil der Abbildung ist das Oberflächengitter des Grättings dargestellt. Wie im letzten Abschnitt angemerkt ist auch in diesem Fall die Oberflächendiskretisierung im Bereich des Grättings sehr viel feiner aufgelöst als auf dem restlichen Schiffsrumpf. Auch in diesem Fall wurde eine Simulation für eine Geschwindigkeit von 14 km/h durchgeführt. Allerdings erfolgte diese unter einem Driftwinkel von  $8^\circ$ , d.h. der Winkel zwischen Anströmung und Längsachse des Schiffes beträgt  $8^\circ$ .

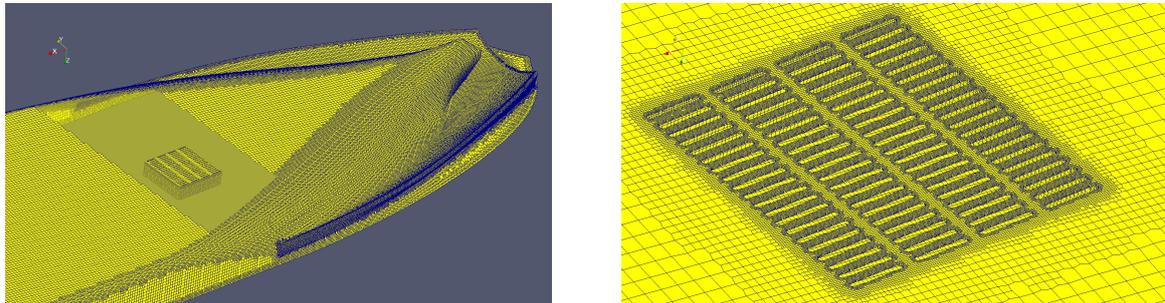


Abb. 5.9: Position und Geometrie eines asymmetrischen Seekastens im Hinterschiff

Durch die asymmetrische Anströmung ergibt sich ebenfalls ein nicht symmetrisches Druckfeld. In Abbildung 5.10 sind die Isokonturen des Druckes auf dem Schiffskörper dargestellt.

Betrachtet sei eine Schnittebene, wie im vorhergehenden Abschnitt, zwischen der Außenhaut und dem inneren Bereich des Seekastens. Abbildung 5.11 beinhaltet die Isoflächen der vertikalen Geschwindigkeitskomponente  $U_z$ . Die Richtung der Anströmung erfolgt von rechts nach links. Die Geschwindigkeit, mit der Wasser in den Seekasten eintritt, ist höher (rote Bereiche) als die Geschwindigkeit, mit der Wasser austritt (blaue Bereiche). In den Abbildungen 5.12 bis 5.13 sind die Geschwindigkeitsvektoren auf Schnittebenen, in Kanalkoordinaten, im Seekasten dargestellt. Eingefärbt sind die Vektoren in Abbildung 5.12 mit Iso-Werten für die vertikale Geschwindigkeitskomponente. Besonders für die mittlere Schnittebene in Y-Richtung findet ein ständiger Wechsel zwischen Ein- und Ausströmen statt. An den Ränder dieser Schnittebene, jeweils in der Nähe der Seekastenwände, ist die Strömung nach unten gerichtet. Auf der Schnittebene in X-Richtung, welche ca. in der Mitte des Seekastens liegt, ergibt sich am Rand zum Seekasten, in der Abbildung rechts, eine nach oben gerichtete Strömung. Da die Längsrichtung der Öffnungen des Grätings nun nicht mehr in Strömungsrichtung liegen, ergibt sich eine Strömung in Querrichtung der Öffnungen. In Analogie zur vertikalen Richtung sind in Abbildung 5.12 die Vektoren mit Iso-Werten der Geschwindigkeitskomponente  $U_y$  eingefärbt. Auf der Schnittebene, rechts außen in der Abbildung, ist diese Komponente ausgehend von der Mitte dieser Ebene in negativer Y-Richtung negativ und in positiver Y-Richtung positiv. Dies lässt auf Wirbel in Größenordnung des Seekastens schließen. Betrachtet seien nun Stromlinien, Abbildung 5.14, welche sich ausgehend von der weißen Linie, welche sich innerhalb des Seekastens und etwas über dem Grätig befindet, ergeben. Die erzeugten Stromlinien zeigen, dass innerhalb des See-

kasten, eine weitgehend gerichtete Strömung vorliegt. Allerdings besteht wie zuvor auch hier das Problem, dass kaum Bereiche zu identifizieren sind, an denen die Strömung in den Seekasten Ein- und Austritt.

Damit war es nicht möglich, einen vereinfachenden Ansatz finden, der die Durchströmung ohne detaillierte Geometrie ermöglicht.

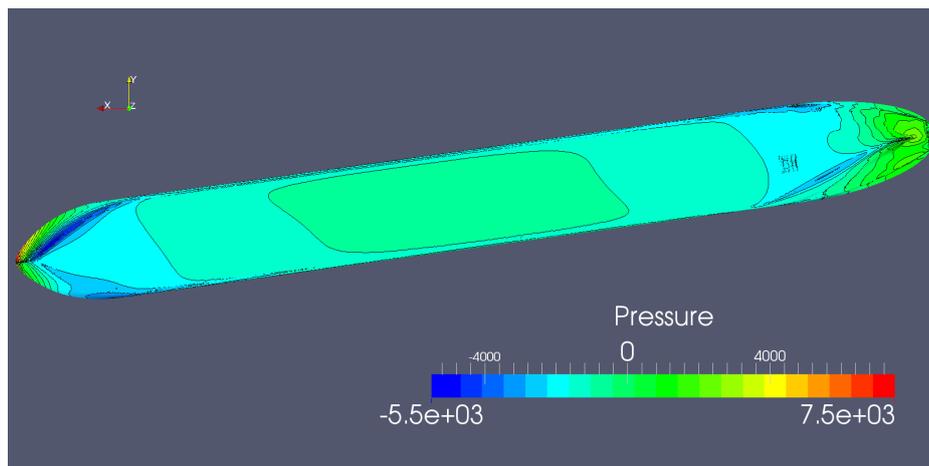


Abb. 5.10: Isoflächen des Druckes auf dem Rumpf unter Drift von  $8^\circ$

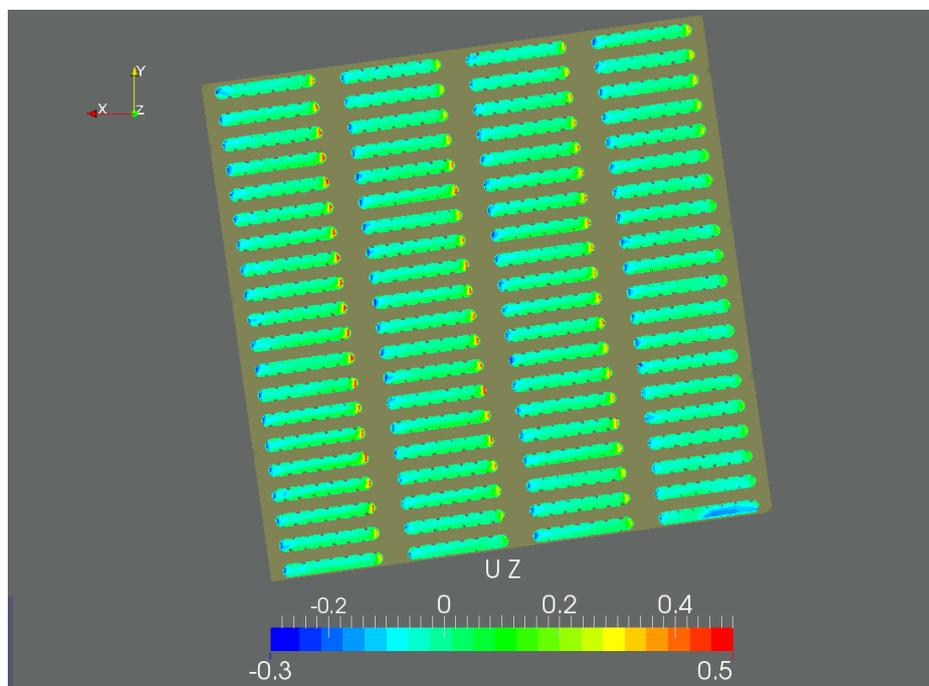


Abb. 5.11: Geschwindigkeitskomponenten von  $U$  in Kanalkoordinaten:  $U_z$

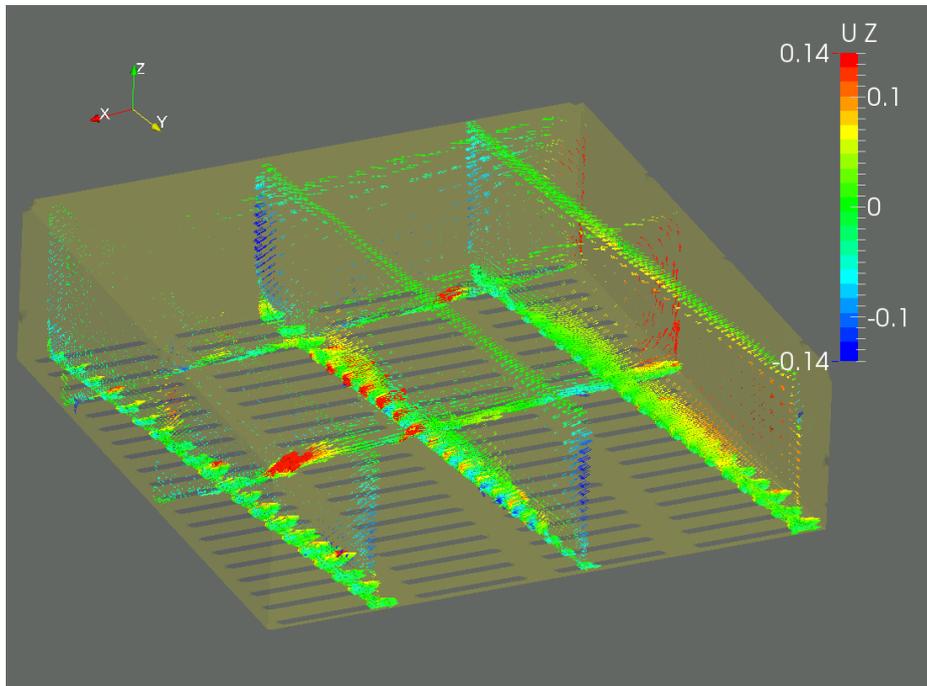


Abb. 5.12: Geschwindigkeitsvektoren auf Schnittebenen im Seekasten, eingefärbt mit Isowerten für die z-Komponente  $U_z$  des Geschwindigkeitsvektors

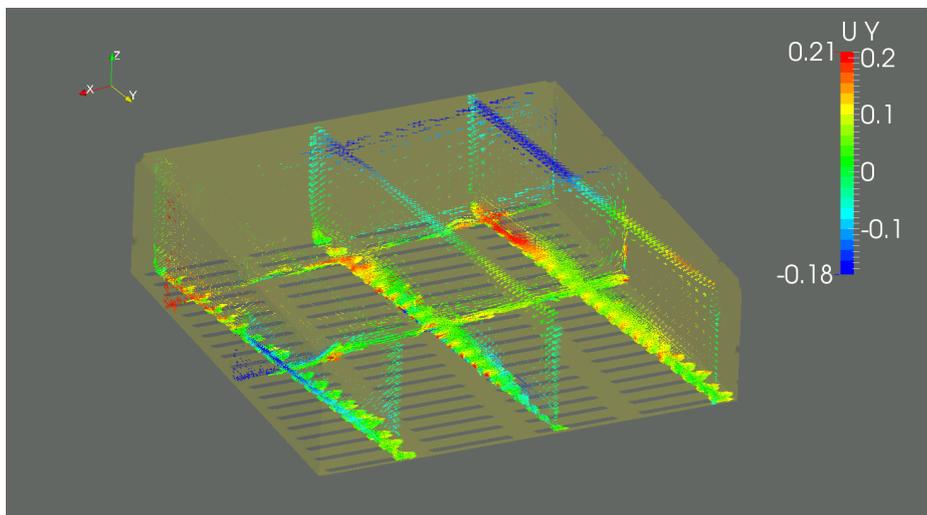


Abb. 5.13: Geschwindigkeitsvektoren auf Schnittebenen im Seekasten, eingefärbt mit Isowerten für die y-Komponente  $U_y$  des Geschwindigkeitsvektors

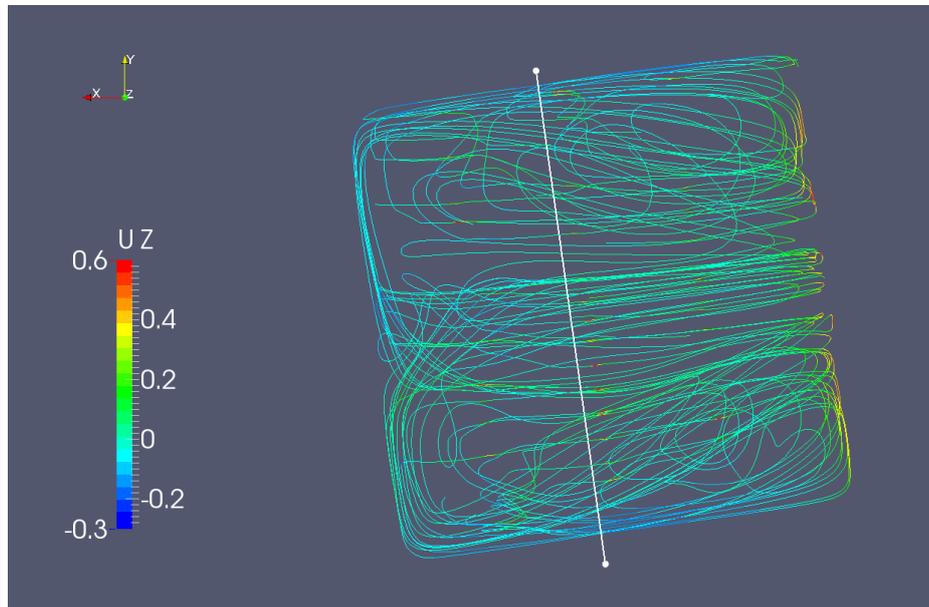


Abb. 5.14: Stromlinien (beidseitig gestartet ausgehend von der weißen Linie) im Seekasten, eingefärbt mit Isowerten für die z-Komponente  $U_z$  des Geschwindigkeitsvektors

## 5.2 Numerische Untersuchungen zu Bugstrahlrudern

### 5.2.1 Vergleich der einzelnen Bugstrahlruder aus dem Modellversuch

In den Modellversuchen wurde eine doppelte Bugstrahlruderanlage verwendet. In diesem Abschnitt wird je eine von diesen geometrisch berücksichtigt und der Einfluss auf den Widerstand untersucht. Das Backbord-Bugstrahlruder ist geometrisch an der maximalen Längsposition positioniert und hat einen Stichkanal nach vorne heraus durch den gekrümmten Bereich des Bugs hindurch. Das Steuerbord-Bugstrahlruder ist direkt vor dem Laderaum positioniert und ist damit an der minimalen Längsposition, Abbildung 5.15.

Für vier Modellgeschwindigkeiten wurden Simulationen mit nicht aktivem Bugstrahlruder ausgeführt. In den Abbildungen 5.16 und 5.17 sind die Isoflächen des Druckes exemplarisch für eine Modellgeschwindigkeit von 0,833 m/s, das entspricht 12 km/h in der Großausführung, dargestellt. Für das Backbord-Bugstrahlruder (links) sind deutliche Druckspitzen an



Abb. 5.15: Geometrie des Backbord- (links) und des Steuerbord- Bugstrahlruders (rechts) mit jeweiligem Oberflächengitter.

den hinteren Kanten der Querkanäle zu erkennen. Auf Grund der Krümmung des Bugs werden diese Kanten nahezu ungestört mit der vollen Anströmung beaufschlagt. Diese Kanten wirken daher als Hindernis. Für das Steuerbord-Bugstrahlruder ist dieser Effekt wesentlich geringer, da die Krümmung des Rumpfes dort nicht mehr so groß ist. Weiterhin ist der Einfluss dieses Effektes lokal sehr eingegrenzt, denn im Bereich des Bugstaus sowie im Bereich des Übergangs zum parallelen Mittelschiff inklusive der vorderen Schultern ist ein Unterschied im Druckfeld schwer ersichtlich. Insgesamt führen diese lokalen Druckspitzen in beiden Fällen, gegenüber dem geschlossenen Modell, zu einer Erhöhung des Widerstands, Abbildung 5.18. Hierbei ist der Widerstand des Backbord-Bugstrahlruders höher als der des Steuerbord-Bugstrahlruders.

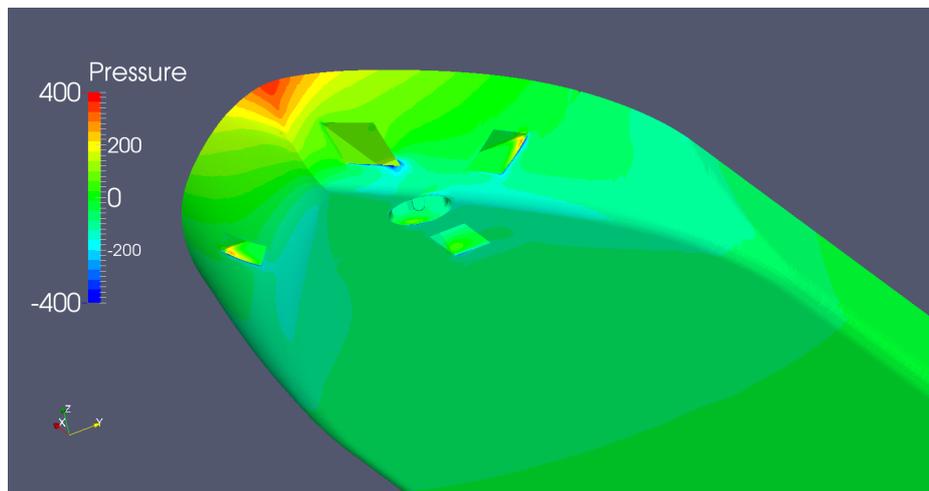


Abb. 5.16: Druckverteilung auf Bugsektion mit Bugstrahlruder hinter dem Vorpiekschott.

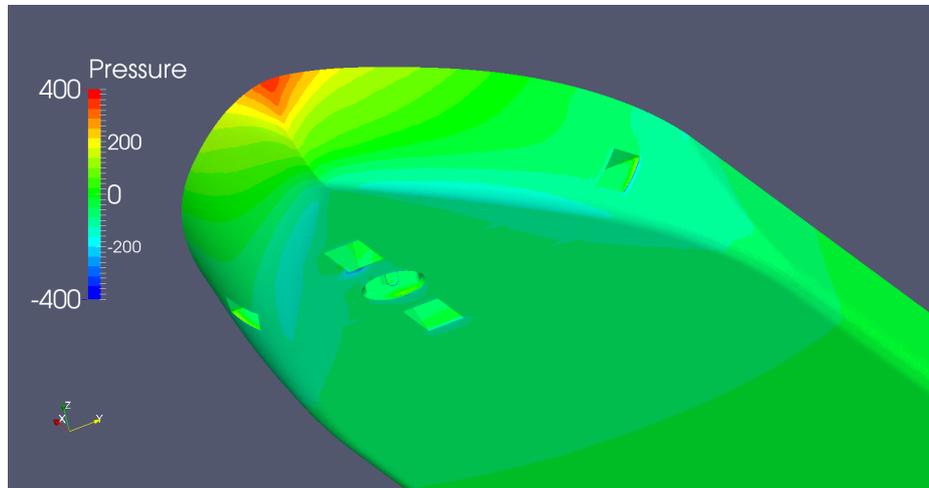


Abb. 5.17: Druckverteilung auf Bugsektion mit Bugstrahlruder vor dem Laderaum.

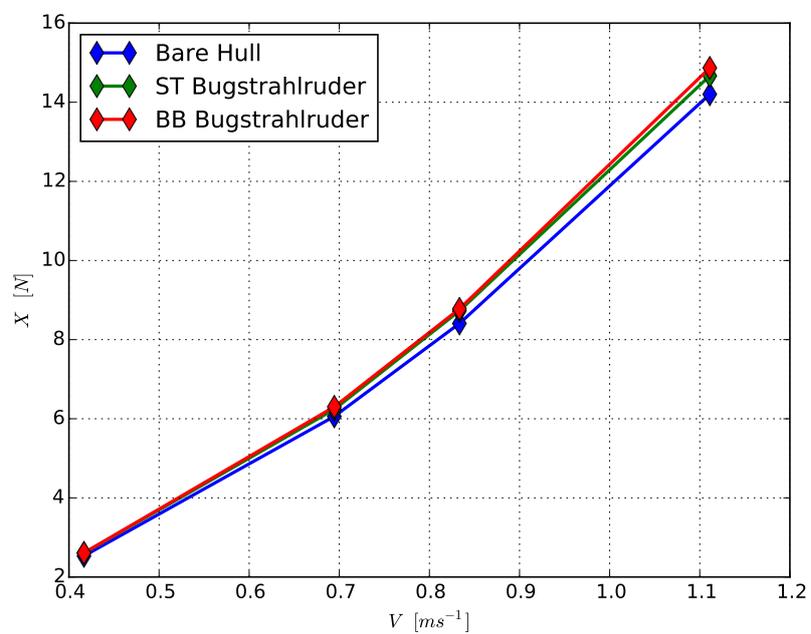


Abb. 5.18: Widerstandsunterschied bei unterschiedlicher Bugstrahlruderposition.

## 5.3 Numerische Untersuchung zur Wirksamkeit eines Bugstrahlruders

Wie in Abschnitt 2.5 gezeigt, nimmt bei steigender Vorausgeschwindigkeit die von den Bugstrahlanlagen erzeugte Querkraft ab. Unter Anwendung des Volumenkraftmodells wurden Simulationen zur doppelten Bugstrahlruderanlage wie im Modellversuch für das aktive Steuerbord- Bugstrahlruder nach backbord gerichtet ausgeführt. Im Experiment änderte sich der gemessene Schub auf der Impellerachse kaum, so dass für die Simulationen der Geschwindigkeitsvariation ein konstanter vertikaler Schub angesetzt wurde. Wie im Abschnitt des Modellversuches angesprochen, waren die gemessenen Widerstände und Querkräfte etwas zu hoch, da das Modell unter aktivem Bugstrahlruder leicht driftete.

Im Vergleich zum Experiment sind daher die berechneten Werte für den Widerstand in der Simulation niedriger, Abbildung 5.19 . Der Verlauf der Querkräfte ist ebenfalls niedriger als im Experiment, Abbildung 5.20, der Verlauf ist jedoch ähnlich bei kleineren Absolutwerten. Da der Pfahlzugversuch im Vergleich mit der numerischen Simulation eine sehr gute Übereinstimmung zeigte und nun selbst bei kleiner überlagerter Geschwindigkeit eine große Abweichung zwischen Modellversuch und Simulation liegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Modellaufhängung einen kleinen Driftwinkel zuließ und damit zu große Werte für Widerstand und Querkraft gemessen wurden.

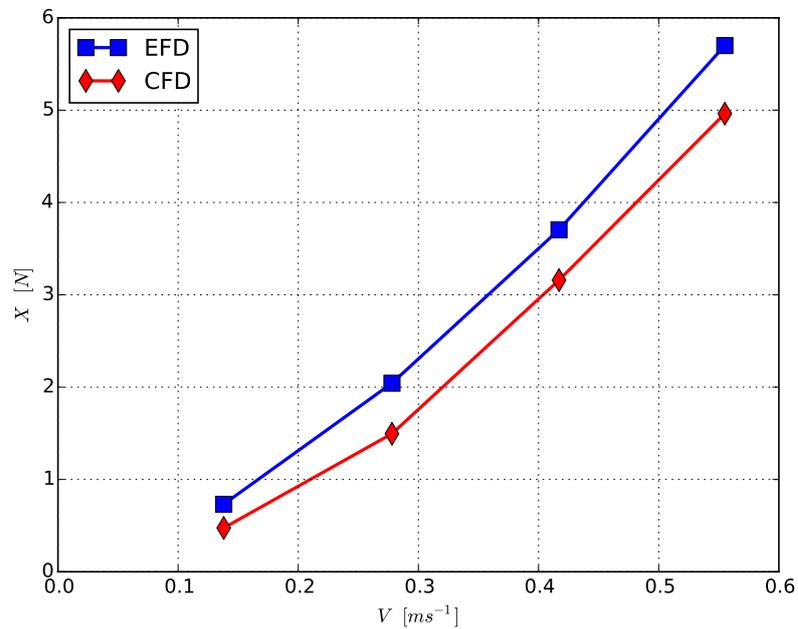


Abb. 5.19: Gemessene und berechnete Seitenkraft im Pfahlzug des Steuerbord-Bugstrahlruders, bei Abstrahlrichtung nach backbord.

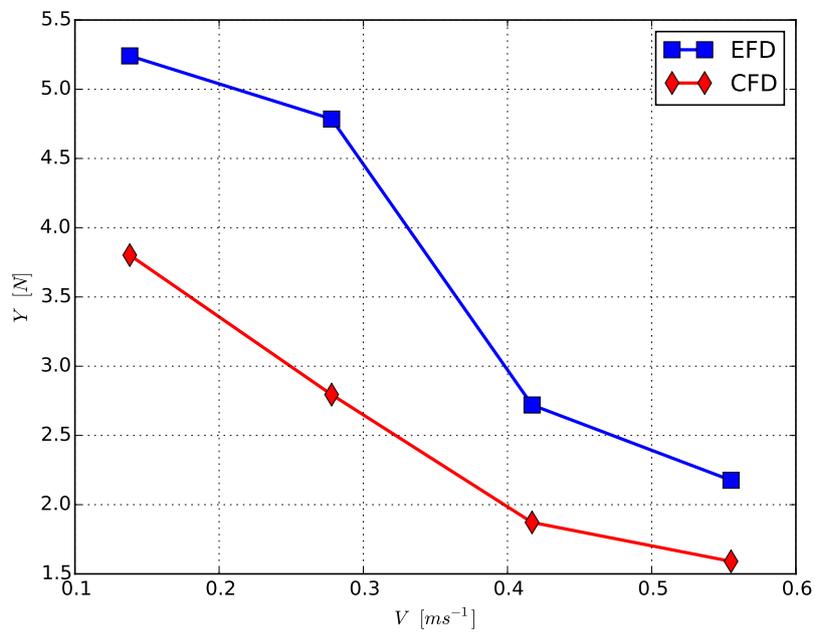


Abb. 5.20: Gemessene und berechnete Seitenkraft im Pfahlzug des Steuerbord-Bugstrahlruders, bei Abstrahlrichtung nach backbord.

### 5.3.1 Einfluss unterschiedlicher Positionen der Bugstrahlanlagen

#### Bugstrahlruder Geometrie Varianten

Als Modell für die Versuchsreihen wurde ein Gütermotorschiff (GMS) im entsprechenden Maßstab ausgewählt. Dieses GMS hat für diesen Schiffstypen repräsentative Abmessungen: eine Länge von 110 m, eine Breite von 11,45 m und einen Tiefgang von bis zu 3 m.

Für die Modellversuche wurde das GMS im Maßstab 1:16 in der Schreinerei des DST gefertigt. Ausgehend von dem komplett geschlossenen Modell (siehe Abbildung 5.21) wurden verschiedene Anordnungen von Seekästen und Bugstrahlrudern im CAD-System entworfen. Für die Modellversuche wurde jedoch nur eine Variante für die Bugstrahlanlagen gewählt: Variante 1, wie in Abbildung 5.22 gezeigt.

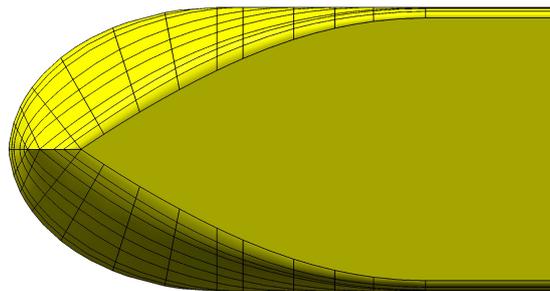


Abb. 5.21: Bugsektion des komplett geschlossenen Modells.

Um Variante 1 auf die Geometrie des komplett geschlossenen Modells zu reduzieren, wurden im Modellversuch alle Rumpfföffnungen verschlossen. Für die entsprechenden Versuchsfahrten können so die Öffnungen gezielt und ohne viel Aufwand geöffnet werden.

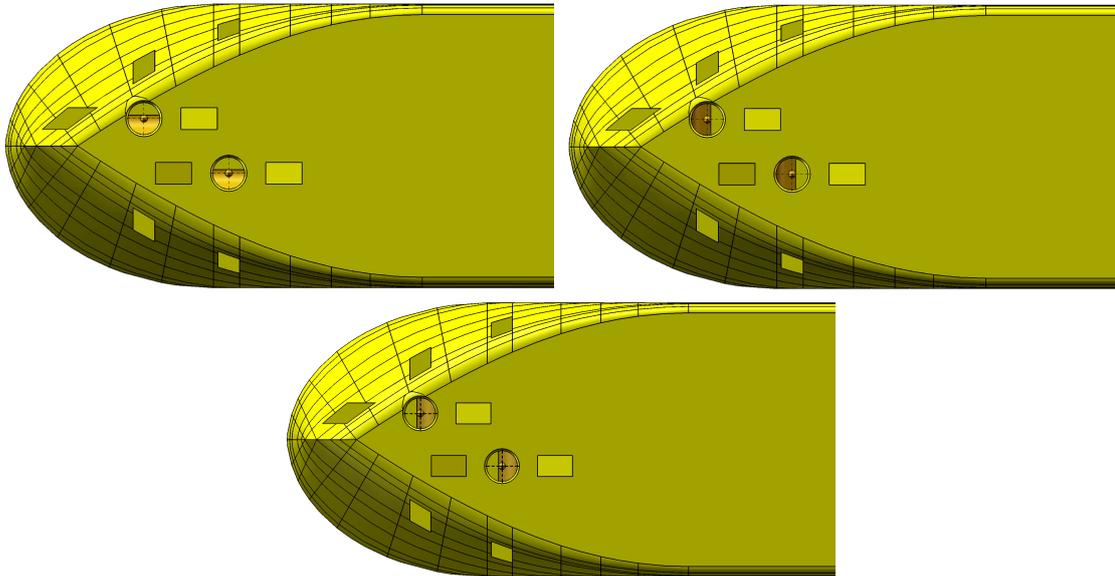


Abb. 5.22: Tankvariante Bugstrahler nach backbord (oben links), achtern (oben rechts), vorne (unten) geöffnet.

Um weitere Anordnungsvarianten der Bugstrahlanlagen zu generieren, wurden die Positionen der Ein- und Auslasskanäle sowie die Neigung der Auslasskanäle variiert. Alle nachfolgenden Varianten wurden nach backbord und achtern geöffnet dargestellt. Abgebildet wird jeweils nur die Variante nach backbord geöffnet.

Die erste Variation ist Variante 2, bei der der vordere Bugstrahler (auf der BB-Seite des Rumpfes) unverändert auf der gleichen Position wie bei der Tankvariante (Variante 1) liegt. Der hintere Bugstrahler auf der Steuerbordseite wurde so weit wie möglich zum Bug verschoben. Die Positionen sind in Abbildung 5.23 gezeigt.

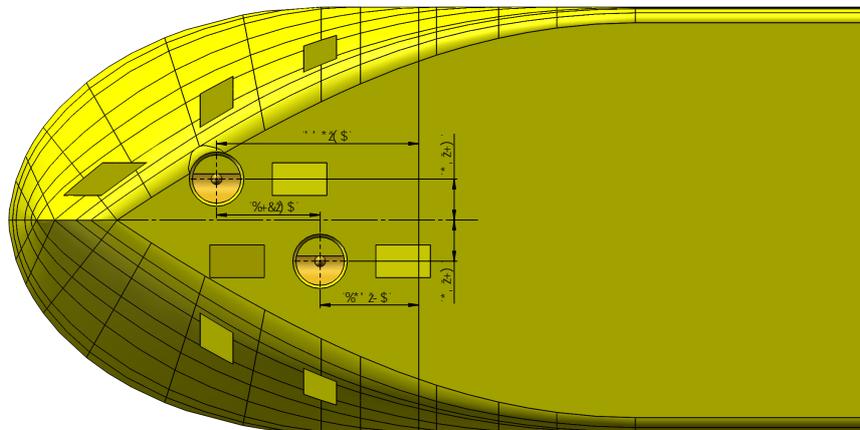


Abb. 5.23: Variante 2 - Bugstrahler nach backbord geöffnet

Bei Variante 3 ist die Position der hinteren Bugstrahlanlage identisch mit der von Variante 2. Die vordere Bugstrahlanlage wurde jedoch soweit in Richtung Mittschiff verschoben, dass der Auslass die Mittschiffsebene berührt.

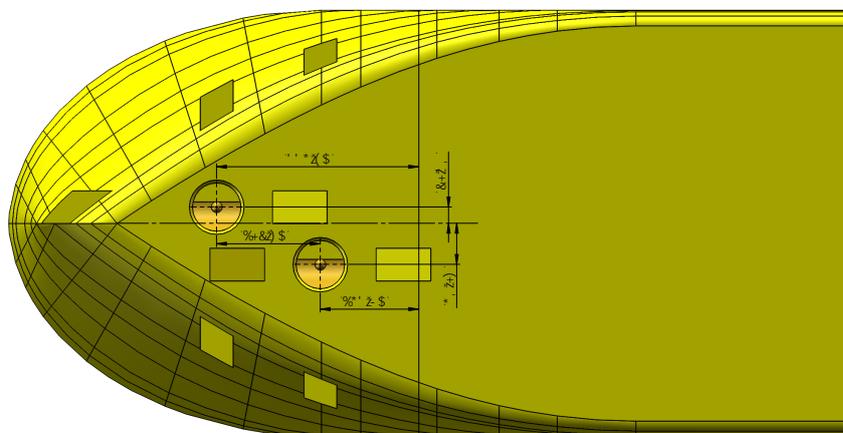


Abb. 5.24: Variante 3 - Bugstrahler nach backbord geöffnet.

Als nächste Variation wurde die vordere Bugstrahlöffnung, die in Richtung Bug verläuft, waagrecht ausgestaltet. Weiterhin wurde die hintere Bugstrahlanlage um 90 cm aus der Mittschiffsebene heraus nach steuerbord verschoben.

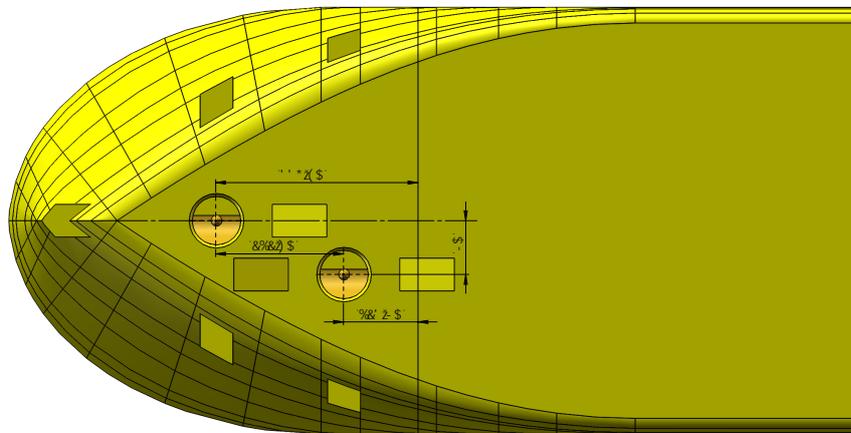


Abb. 5.25: Variante 4 - Bugstrahler nach backbord geöffnet.

Die Evolution der Geometrie von Variante 4 auf Variante 5 beschränkt sich auf die Lage der Kanäle der Backbordanlage. Diese verlaufen nun ebenfalls unter einem Winkel und nicht mehr horizontal, wie in Abbildung 5.26 zu sehen ist.

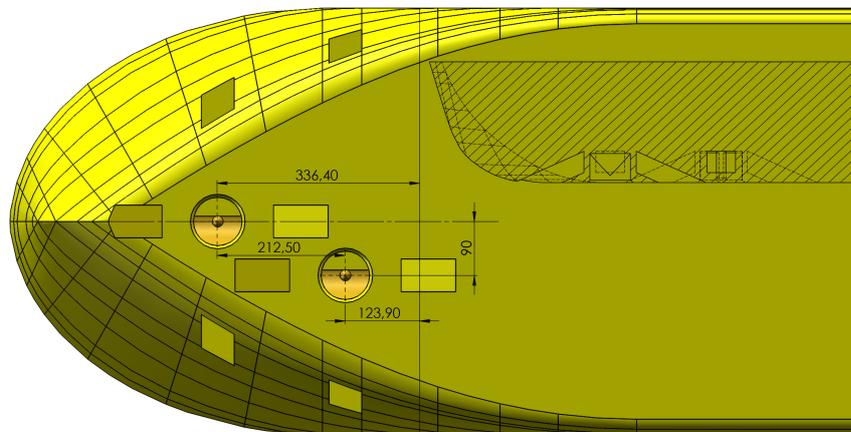


Abb. 5.26: Variante 5 - Bugstrahler nach backbord geöffnet.

Variante 6 ist eine Kombination aus Variante 3 und Variante 1. Die vordere Anlage ist aus Variante 3 übernommen worden und die hintere Anlage entspricht der aus Variante 1 bekannten Position. Details können Abbildung 5.27 entnommen werden.

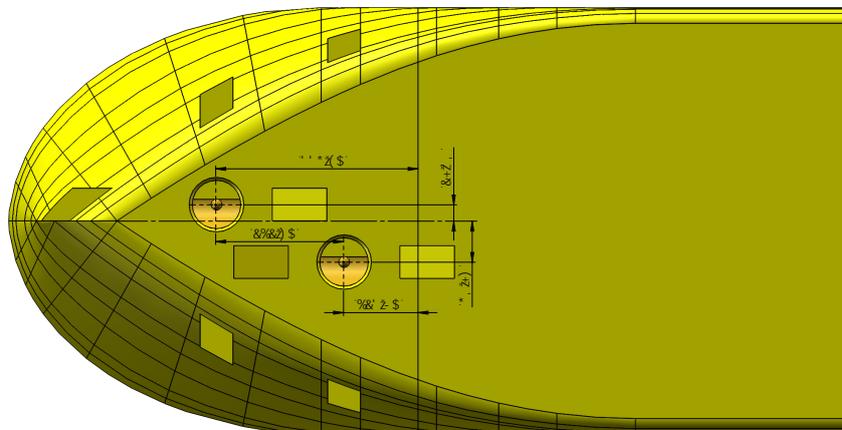


Abb. 5.27: Variante 6 - Bugstrahler nach backbord geöffnet.

### **Einfluss der verschiedenen Varianten**

Zunächst wurden Untersuchungen angestellt, die auf den selben Gittern wie die Simulationen mit freier Oberfläche basieren, jedoch wurde das Rechengebiet auf unterhalb der unausgelenkten freien Oberfläche begrenzt. Weiterhin wurde die Verfeinerungszone für die freie Oberfläche entfernt, um Zellen zu sparen. Die genaue Vernetzungsstrategie ist in Kapitel 3.2.1 dargelegt worden.

Mit jeder Geometrievariation wurden folgende Geschwindigkeiten der Großausführung im Modell simuliert:  $v_S \in \{8, 10, 12, 14\}$  km/h. Hieraus ergeben sich mit einem Maßstabsfaktor von  $\lambda = 16$  und unter Einhaltung der Froude'schen Ähnlichkeit folgende Modellgeschwindigkeiten:  $v_M \in \{0.556, 0.694, 0.833, 0.972\}$  m/s.

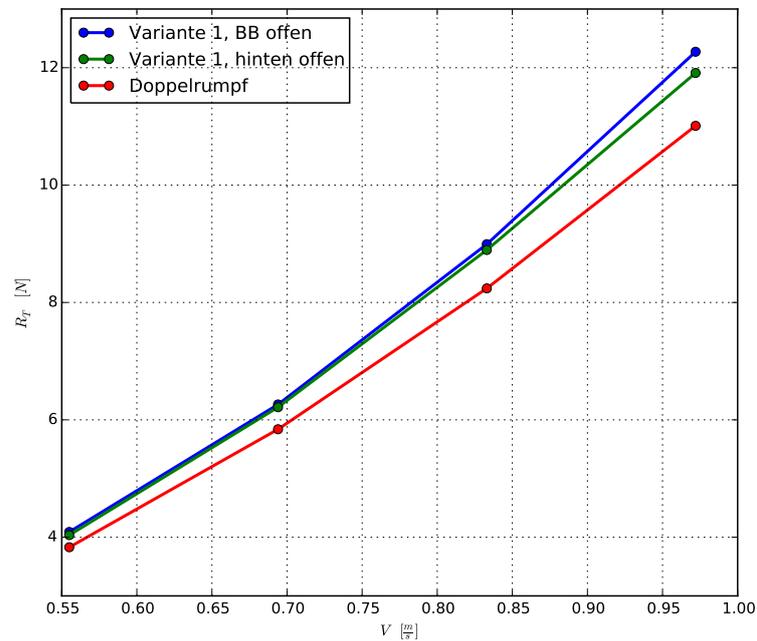


Abb. 5.28: Gesamtwiderstand über Geschwindigkeit bei Variante 1, hinten und backbord geöffnet.

Abbildung 5.28 zeigt den Vergleich der Gesamtkraft auf den Doppelrumpf für Variante 1, zwischen den nach hinten und backbord geöffneten Bugstrahlanlagen. Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist zwischen den beiden Öffnungsrichtungen kein Unterschied in der Gesamtkraft erkennbar. Mit steigender Schiffsgeschwindigkeit wird der Unterschied zwischen beiden Öffnungsvarianten jedoch deutlicher. Eine Öffnung nach backbord hat sich als strömungsgünstiger als eine nach hinten gerichtete Öffnung herausgestellt.

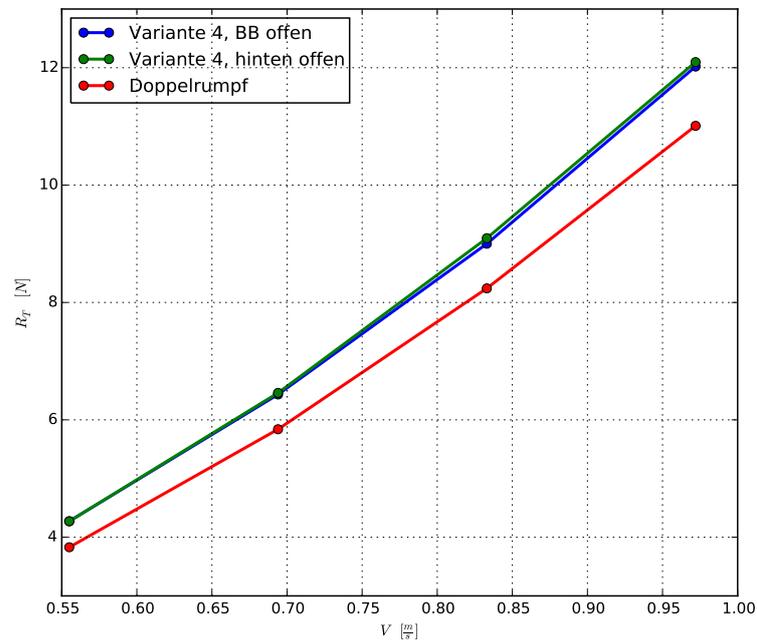


Abb. 5.29: Gesamtwiderstand über Geschwindigkeit bei Variante 4, hinten und backbord geöffnet.

Bei Geometrievariante 4 ist der Unterschied in der Gesamtkraft zwischen den beiden Öffnungsrichtungen nicht so stark ausgeprägt wie bei Variante 1. Wie zu sehen ist, ist der Unterschied der beiden Öffnungen ungefähr in der Größenordnung der Strichstärke des Diagramms und daher fast zu vernachlässigen.

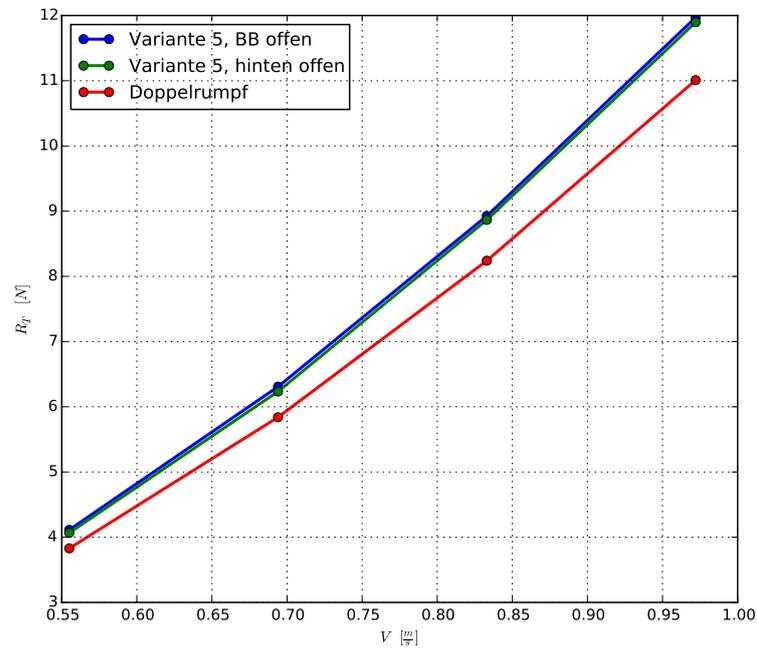


Abb. 5.30: Gesamtwiderstand über Geschwindigkeit bei Variante 5, hinten und backbord geöffnet.

Im Vergleich zu Variante 4 weist die Geometrievariante 5 einen ziemlich ähnlichen Gesamtkraftverlauf über die jeweiligen Geschwindigkeiten auf. Der maximale Abstand zwischen den aus den beiden Öffnungsrichtungen resultierenden Gesamtkräften ist gleichermaßen gering. Allerdings sind die für Variante 5 bestimmten Gesamtkräfte etwas geringer als die für Variante 4.

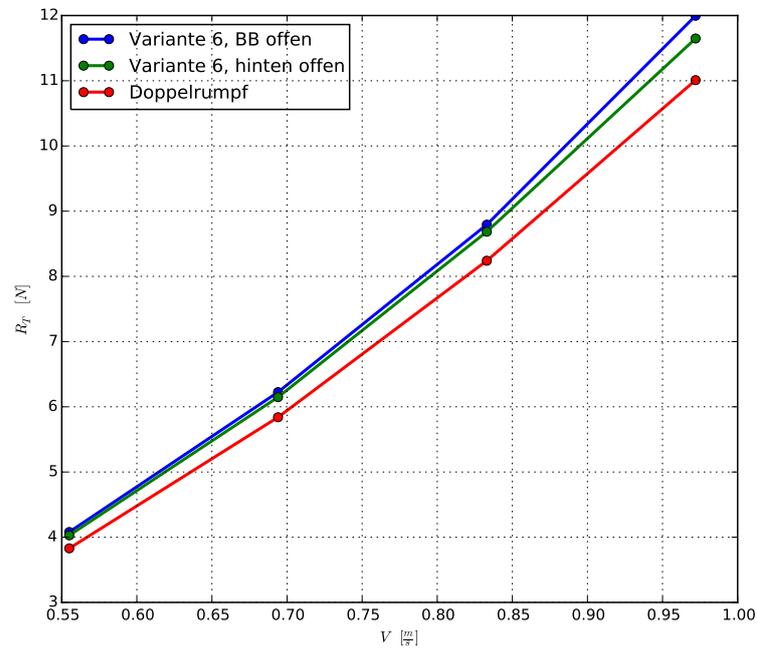


Abb. 5.31: Gesamtwiderstand über Geschwindigkeit bei Variante 6, hinten und backbord geöffnet.

Variante 6 reiht sich in die Verläufe der Gesamtkräfte der bisher präsentierten Variationen ein, jedoch ist die Gesamtkraft geringer als bei den Varianten 1, 4 und 5. Zusätzlich hat ein nach hinten geöffneter Kanal einen stark positiven Einfluss auf die Gesamtkraft, besonders bei höheren Geschwindigkeiten.

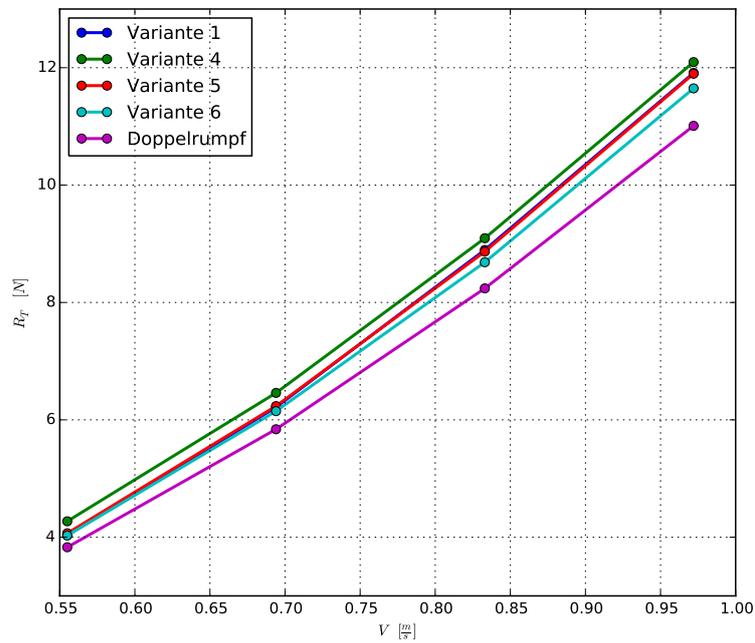


Abb. 5.32: Gesamtwiderstand über Geschwindigkeit für alle gerechneten Varianten mit Öffnung nach achtern.

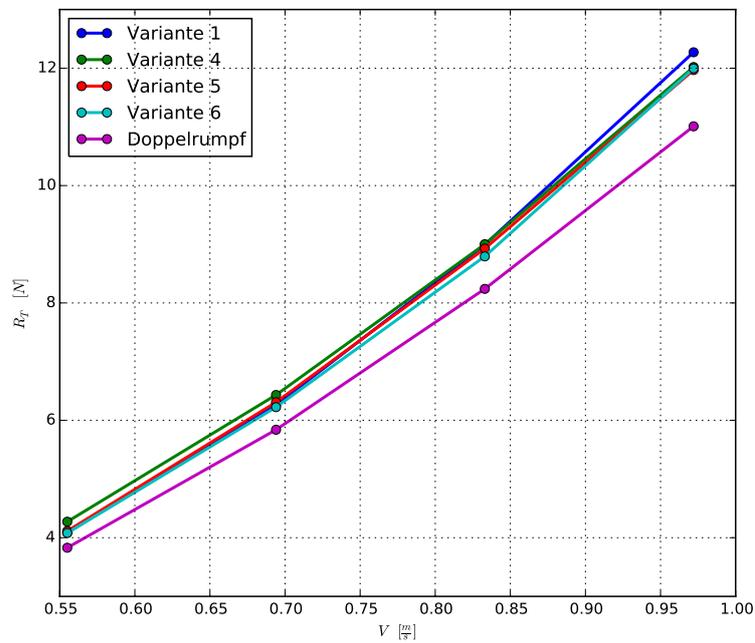


Abb. 5.33: Gesamtwiderstand über Geschwindigkeit für alle gerechneten Varianten mit Öffnung an Backbord.

Abbildungen 5.32 und 5.33 zeigen einen Vergleich der Gesamtkräfte für nach hinten und backbord geöffnete Bugstrahlanlagen. Generell ist zu sehen, dass die nach hinten geöffneten Anlagen einen geringeren Gesamtwidestand haben, als wenn die selben Anlagen nach Backbord geöffnet sind. Mit steigender Modellgeschwindigkeit nimmt ebenfalls der Unterschied im Widerstand zwischen den nach backbord und nach hinten geöffneten Anlagen zu. Hierbei haben die nach hinten geöffneten Anlagen durchweg niedrigere Widerstandswerte. Unabhängig von der Öffnungsrichtung der Auslässe, hat Variante 6 durchweg den niedrigsten Zusatzwiderstand und ist daher allen anderen Varianten mit Blick auf den Schiffswiderstand überlegen. In Schiffslängsrichtung sind beide Anlagen bei Variante 4 und Variante 6 identisch ausgerichtet und deren Abstand zueinander ist ebenfalls unverändert. Von Variante 4 zu Variante 6 wurden beide Anlagen jedoch um 27,38 cm nach Backbord hin verschoben.

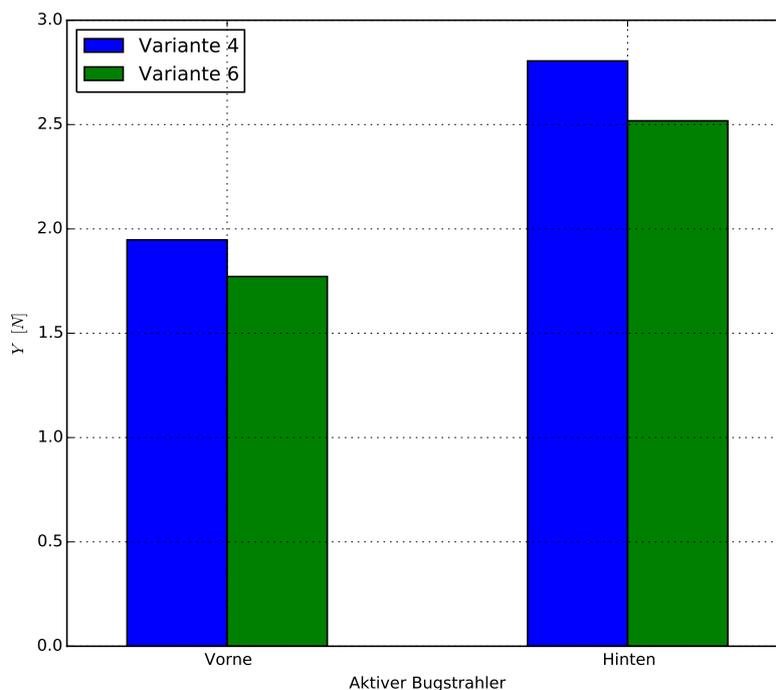


Abb. 5.34: Erzeugte Querkräfte der Varianten 4 und 6 je Bugstrahlruder.

Zum Vergleich der Varianten 4, mit der größten Zunahme zum Widerstand und der Variante 6, welche den geringsten Zuwachs im Widerstand hatte, wurden nun für diese zwei Varianten Simulationen mit aktiver Bugstrahlruder mit dem Volumen-Kraft-Modell bei gleichem vertikalem Schub auf der Impellerachse durchgeführt (siehe Abbildung 5.34). Die gewählte Modellgeschwindigkeit betrug 0,417 m/s, das entspricht 6 km/h für die Großaus-

führung. Für beide Varianten ist die erzeugte Querkraft für das hintere Bugstrahlruder circa 40% größer als für das vordere Bugstrahlruder. Unabhängig von der jeweiligen aktiven Anlage, entwickelt Variante 4 eine um etwa 10% höhere Querkraft, als Variante 6.

Interessanterweise ist gerade die Variante 4, bei der der Stichkanal des vorderen Bugstrahlruders mittig positioniert ist, die Variante mit dem höchsten Zuwachs im Widerstand bei größer werdenden Geschwindigkeiten. Die hier ausgewählten

## **5.4 Numerische Untersuchung eines als Rezess ausgeführten Bugstrahlruders**

Zur Vereinfachung der Geometrie und damit der Gittergenerierung wurde ein Bugstrahlruder als Rezess ausgeführt. Dazu wurden alle Öffnungen des Bugstrahlruders als Rezess ausgeführt (siehe Abbildungen 5.35 und 5.36). Die Anzahl der Kontrollvolumina reduzierte sich im Vergleich zur detaillierten Geometrie um circa 12%. Zu drei Modellgeschwindigkeiten wurden Simulationen durchgeführt, wobei für die Modellgeschwindigkeit von 0,416 m/s die Isokonturen des Druckes in Abbildungen 5.37 und 5.38 dargestellt sind. Das Simulationsergebnis in Abbildung 5.37 wurde mit der detaillierten Geometrie berechnet und in Abbildung 5.38 wurde die Vereinfachung durch Rezesse angewendet. In beiden Fällen ist die Druckverteilung ähnlich, denn die Druckspitzen an den hinteren Kanten der Querkanäle sind von gleicher Größe. Die Öffnung des Stichkanals nach vorne zeigt nur leichte Unterschiede an der oberen Kanalkante, ansonsten sind die Druckdifferenzen klein. Der einzige größere Unterschied liegt im Zulauf des Impellers am Schiffsboden vor, dort hat sich für den Rezess eine größere Druckspitze eingestellt. Dass die Unterschiede sehr klein sind, zeigt sich auch in den berechneten Widerständen (siehe Abbildung 5.39). Die berechneten Widerstände für die detaillierte Geometrie und die Geometrie als Rezess sind für alle betrachteten Modellgeschwindigkeiten identisch. Zur Bestimmung des numerischen Widerstandes ist es ausreichend, die Öffnungen eines inaktiven Bugstrahlruders als Rezess zu modellieren.

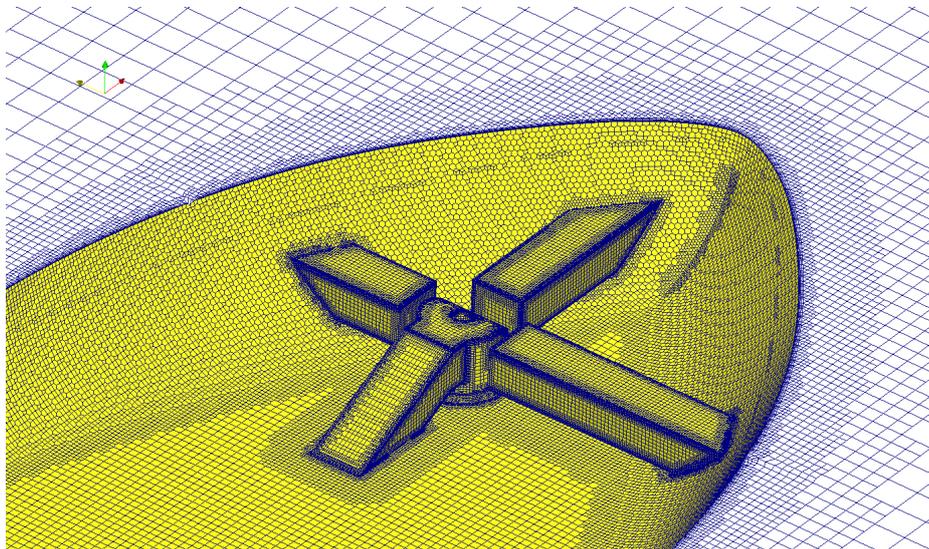


Abb. 5.35: Detaillierte Geometrie des backbord Bugstrahlruders.

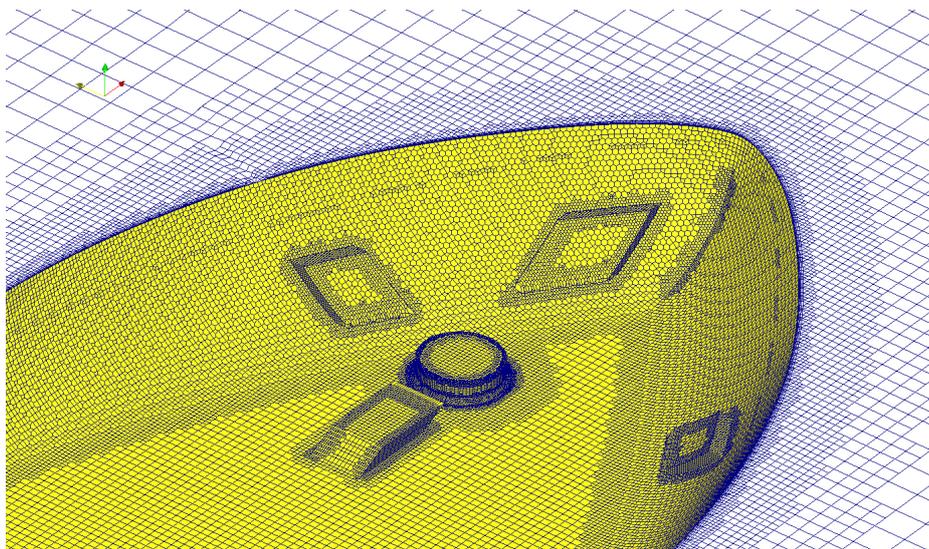


Abb. 5.36: Als Rezess ausgeführtes backbord Bugstrahlruder.

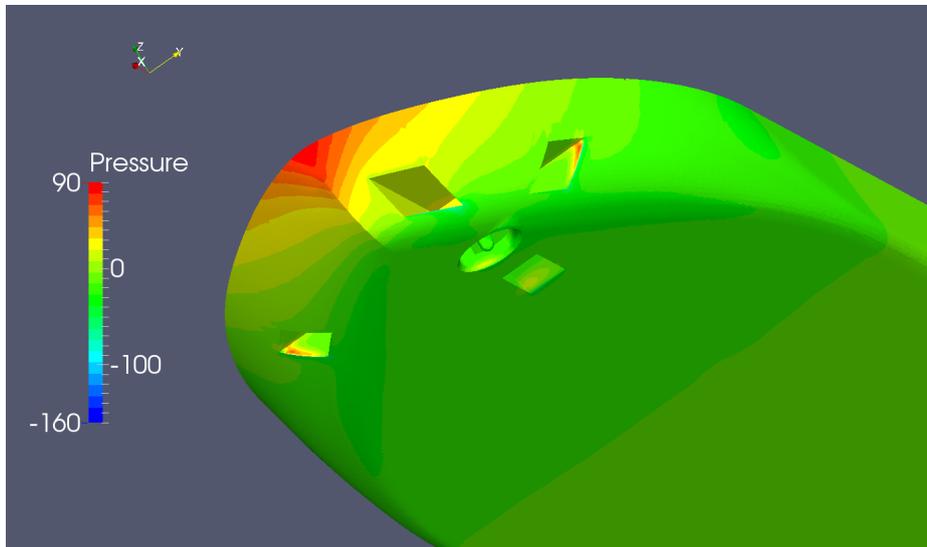


Abb. 5.37: Druckverteilung im Bugbereich des Rumpfes mit detaillierter Geometrie des Bugstrahlruders.

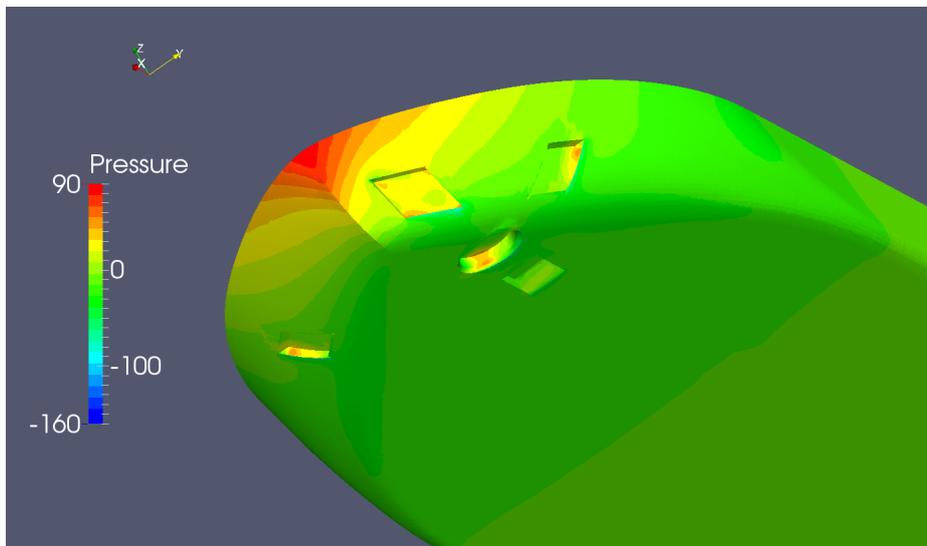


Abb. 5.38: Druckverteilung im Bugbereich des Rumpfes mit Geometrievereinfachung des Bugstrahlruders als Rezess.

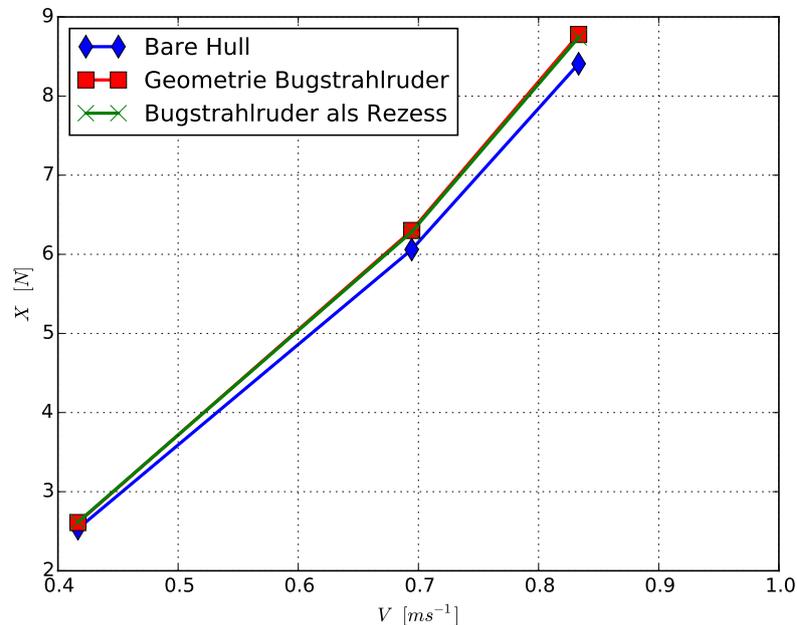


Abb. 5.39: Widerstände des Bugstrahlruders mit detaillierter Geometrie und als Rezess.

## 5.5 Anwendung des entwickelten Modells für ein aktives Bugstrahlruder

Das in Abschnitt 5.14 entwickelte Modell eines aktiven Bugstrahlruders (BSRM) wird nun angewendet. Die Ergebnisse werden mit Ergebnissen unter Anwendung des Volumenkraftmodells (VKM), Abschnitt 3.1.3, verglichen. Mit dem Volumenkraftmodell wurde in den bisherigen Simulationen plausible Ergebnisse erzielt, so dass die mit diesem detaillierten Modell berechneten Ergebnisse als Vergleich für das neue vereinfachte Modell herangezogen werden. Zu einer exemplarischen Modellgeschwindigkeit von 0,417 m/s wurden Simulationen mit unterschiedlich vorgegebenen vertikalen axialen Impellerschüben unter Anwendung beider Modelle für ein nach backbord gerichtetes Bugstrahlruder durchgeführt. Für das VKM wurde wieder eine Propellerscheibe, ähnlich zu Abbildung 3.13, verwendet, um den zusätzlichen Impuls in die Strömung einzubringen. Für das BSRM wurden für den zusätzlichen Impulseintrag und der Einhaltung der Massenerhaltung die Flächen über die das Ein- und Ausströmen realisiert wird wie in Abbildung 4.3 gewählt.

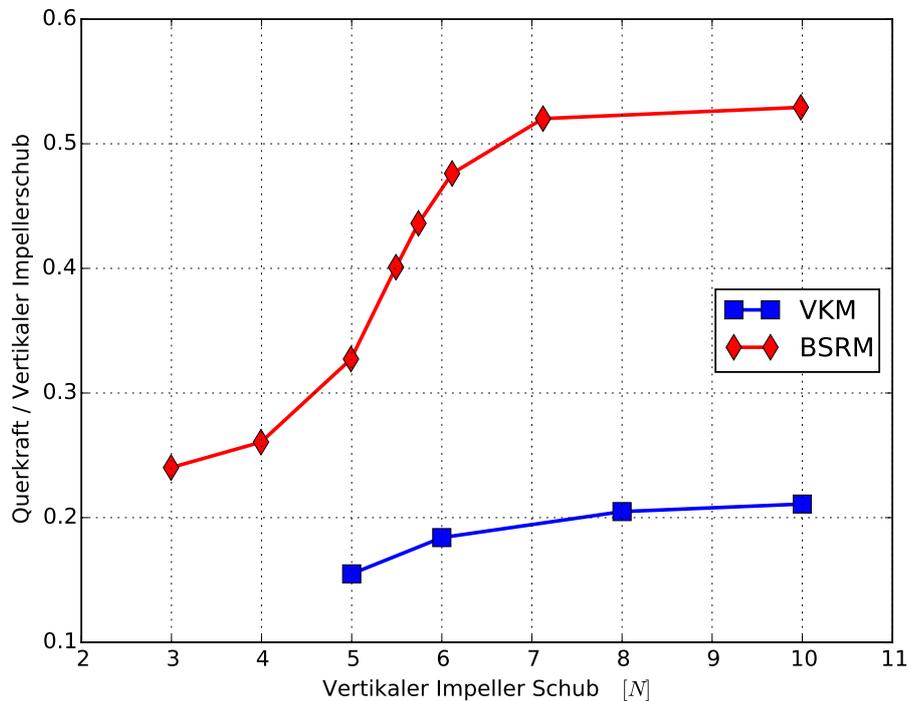


Abb. 5.40: Berechnete Querkraft bezogen auf den eingesetzten Impellerschub.

In Abbildung 5.40 sind die berechneten Seitenkräfte dividiert durch den eingesetzten Impellerschub über den eingesetzten Impellerschub abgetragen. Für das VKM wird lediglich maximal 21% des eingesetzten Impellerschubes in eine Querkraft umgesetzt, während es für das BSRM bis über 50% sind. Auch ist ein völlig anderer funktionaler Zusammenhang zwischen Impellerschub und Querkraft für beide Modelle ersichtlich. Dies ist erklärbar mit den unterschiedlichen Ansätzen der Modelle. Für das BSRM wird von der zu erzeugenden Querkraft ausgegangen und anschließend wird mit vereinfachenden reibungsfreien Ansätzen auf einen vorzugebenden Impellerschub geschlossen. In diesem Ansatz ist also weder eine detaillierte Geometrie der Kanäle, die geometrische Form für die Umlenkung der Strömung, noch ein Einfluss der Reibung enthalten. Beim VKM ist die Seitenkraft das Resultat nach Wirkung dieser Effekte. Zur Untersuchung einer Abhängigkeit zwischen den Modellen wurde folgender Ansatz gewählt. Zu jeder mit dem VKM berechneten Querkraft wurde durch Interpolation der Impellerschub ermittelt, der für das BSRM nötig ist, um die vorgegebene Querkraft zu berechnen.

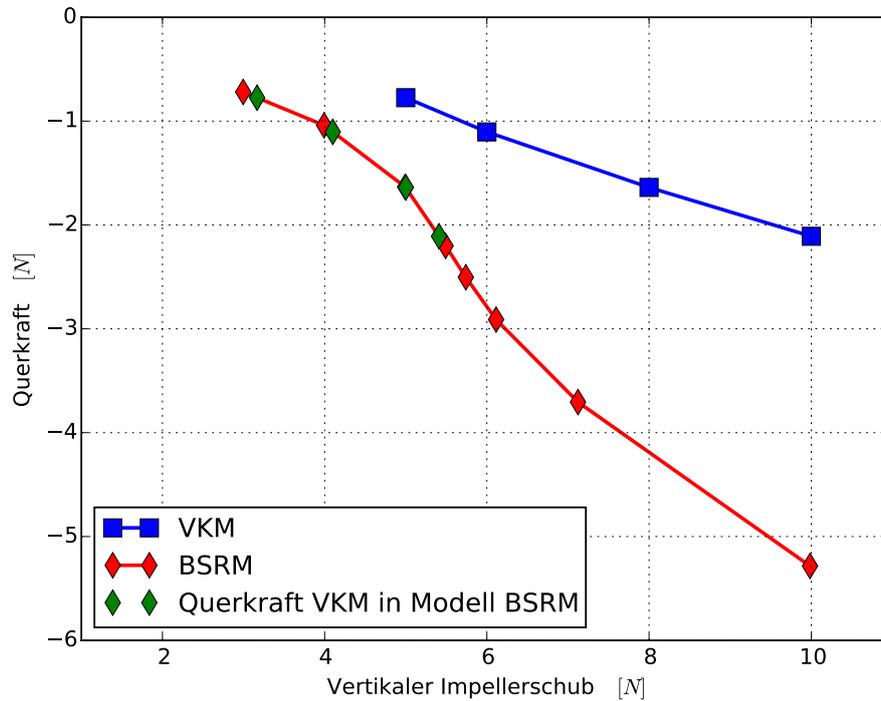


Abb. 5.41: Berechnete Querkräfte mit VKM und BSRM.

Dies ergibt die durch die grünen Fläche dargestellten Werte in Abbildung 5.41. Im Anschluss werden die zu den Querkräften interpolierten Impellerschübe aus dem BSRM, bezogen auf den in VKM eingesetzte Impellerschub, Abbildung 5.42, über den im VKM eingesetzten Impellerschub aufgetragen. Es zeigt sich ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem einzusetzenden Schub im BSRM und dem vorzugebenden Schub im VKM.

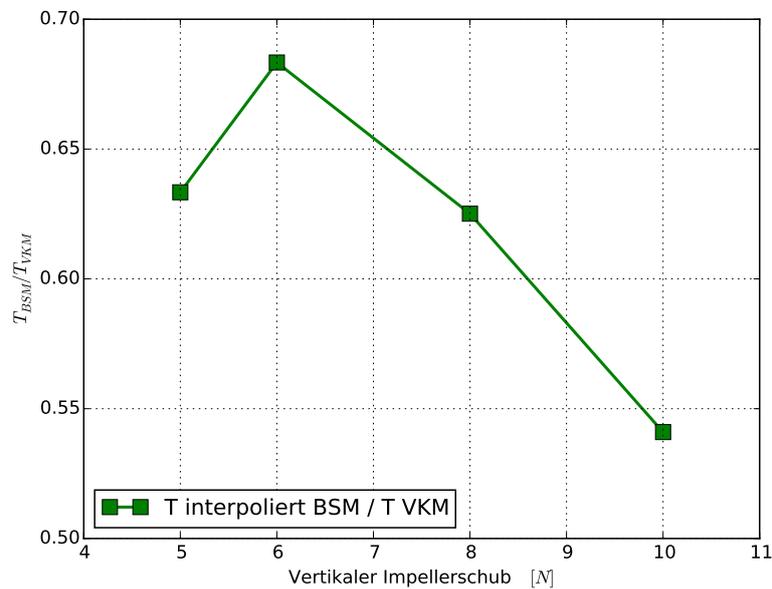


Abb. 5.42: Verhältnis der vorgegebenen Impellerschübe

Wie gezeigt ist dieser nichtlineare Zusammenhang allein durch eine Variation der Impellerschübe hervorgerufen, weitere Parameter wie z.B. Schiffsgeschwindigkeit, Tiefgang und Wassertiefe wurden in diesem exemplarischen Beispiel nicht berücksichtigt. Allein durch die Vernachlässigung detaillierter Geometrie, Umlenkung der Strömung und Reibungseffekten konnte gezeigt werden, dass dieser vereinfachte Ansatz nicht zielführend ist.

## 6 Zusammenfassung

In diesem Forschungsvorhaben wurden die Strömungsfelder besonders in der Nähe von Bugstrahlanlagen und Seekasten-Öffnungen mit großem Aufwand experimentell und numerisch untersucht. Eines der ursprünglich geplanten Ziele, nämlich eine vereinfachte Beschreibung der Strömungswirkung von Außenhautdurchbrüchen zu formulieren, konnte nur teilweise erreicht werden. Dies hat unterschiedliche Gründe, die im Folgenden für Bugstrahler und Seekästen getrennt erläutert werden.

### 6.1 Bugstrahlruder

Im Rahmen des Vorhabens konnte ein vereinfachtes Ersatzmodell für die Darstellung einer Bugstrahlanlage für den Einsatz in CFD-Berechnungen entwickelt werden. Dieses Ersatzmodell führte jedoch nicht zu der erhofften Verkürzung der Rechenzeit. Der reduzierte Aufwand der Geometrieaufbereitung und Vernetzung rechtfertigen ebenfalls nicht den Informationsverlust, den die Modellierung mit sich bringt. Es hat sich zudem gezeigt, dass die Strömungsvorgänge und geometrischen Zusammenhänge zu komplex sind, um mit einer algebraischen Näherungsformel beschrieben werden zu können. Damit entfällt auch die angedachte Möglichkeit, durch eine einfache Berechnung eine optimale Position und Formgebung der Bugstrahlanlage im Sinne eines interaktiven Beratungswerkzeugs zu bestimmen.

Auf der anderen Seite sind die Freiheiten in der Gestaltung der Bugstrahlanlage sehr begrenzt, da der Raum zwischen vorderem Kollisionsschott und Laderaum möglichst klein gehalten wird, um ein maximales Laderaumvolumen zu erreichen. Die Lage des Bugstrahlers kann deshalb kaum variiert werden. Bei zwei Anlagen im Vorschiff sind die Möglichkeiten zur Positionsvariation noch stärker eingeschränkt.

Es konnte trotzdem gezeigt werden, dass bei einer Doppelanlage ein geringerer Widerstand erreicht wird, wenn keiner der beiden vorderen Ausströmkanäle in der Schiffsmitte liegt. Gleichzeitig verringert sich dann allerdings die Querkraft beim Manövrieren. Es könnte vorteilhaft sein, wenn bei einer Doppelanlage die beiden vorderen Kanäle nebeneinander im Bug austreten würden. Dies würde aber eine Überkreuzung der Kanäle im Rumpf erfordern, was mit einem erheblichen baulichen Mehraufwand und damit Zusatzkosten verbunden ist, die die Schiffseigner nicht zu tragen bereit sind.

Einen großen Nachteil einer Drei- oder Vier-Wege-Anlage stellt das Ansaugen des Wassers vom Boden dar. Bei sehr geringem Tiefgang kann dies unumgänglich sein, da sonst die Gefahr besteht, dass der Impeller Luft ansaugt. Bei ausreichendem Tiefgang entstehen aber unnötige Verluste durch die Umlenkung der Strömung um 90°. Es ist z. Zt. keine konstruktive Lösung bekannt, die es erlaubt, das Wasser wahlweise vom Boden oder von der Seite, die der gewünschten Schubrichtung gegenüber liegt, anzusaugen.

Eine weitere Maßnahme, die zur Verringerung des Widerstands beitragen könnte, wären Verschlussklappen außen vor den Ausströmkanälen – im Idealfall im geschlossenen Zustand bündig mit der Außenhaut. Diese werden in der Schifffahrt aufgrund ihrer potenziellen Störanfälligkeit und des Wartungsaufwands nicht akzeptiert. Die in der Seeschifffahrt eingesetzten Gitterstäbe quer zu den Stromlinien, die zum hydraulischen Verschluss bei höheren Geschwindigkeiten führen, wirken in der Binnenschifffahrt nicht. Hier werden keine ausreichend hohen Geschwindigkeiten erreicht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich in dem zur Verfügung stehenden Bau- raum und mit den verfügbaren Bugstrahler-Konzepten durch Veränderung der Lage der Ausströmkanäle nur geringe Verbesserungen erreichen lassen. Es wurden allerdings Verbesserungspotenziale erkannt, die konstruktive Änderungsmaßnahmen an den Bugstrahlanlagen erfordern würden. Auch können die Verbesserungen nicht durch Berechnungen mit einem vereinfachten mathematischen Modell nachgewiesen werden. Hier sind detaillierte CFD-Berechnungen oder weitere aufwendige experimentelle Untersuchungen erforderlich. Dies gibt Anlass zu weitere Forschungsanstrengungen.

## 6.2 Seekasten

Der Seekasten hat in seiner klassischen Form einen Vorteil: Der Wärmetauscher ist vor mechanischen Beschädigungen geschützt. Darüber hinaus ist sein konstruktiver Aufbau sehr einfach und entsprechend kostengünstig. Dem stehen allerdings einige Nachteile gegenüber. Durch die zurückgesetzte Position und die teilweise Versperrung durch den Gitterrost ist die Durchströmung relativ gering. Unter bestimmten Manöversituationen kann es dazu kommen, dass der Seekasten nicht mehr hinreichend durchströmt wird.

Die aufwendigen Berechnungen und Modellversuche, die durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Durchströmung des Seekastens nicht durch ein vereinfachtes numerisches Ersatzmodell beschrieben werden kann. Die Strömung wird von viskosen Effekten dominiert. Deshalb müssen die CFD-Berechnungen für die Großausführung mit entsprechend hoher Gitterauflösung durchgeführt werden. Wegen der Nichtähnlichkeit der Reynoldszahlen ist auch eine direkte Übertragung der Modellversuchsergebnisse auf die Großausführung zweifelhaft.

Als weitere Schwierigkeit hat sich gezeigt, dass sich selbst bei (global) stationärer Schiffsumströmung keine stationäre Strömung im Seekasten einstellt. Die Bereiche am Einlassgitter, in denen das Wasser in den Seekasten ein- und ausströmt, sind nicht allgemein identifizierbar.

Die Lage und Größe des Seekastens wird zum einen durch die Raumverhältnisse im Maschinenraum im Hinterschiff bestimmt. Zum anderen muss sichergestellt sein, dass der Seekasten auch bei Mindesttiefgang getaucht ist. Unter diesen Randbedingungen gilt es dann eine Position zu finden, die auch unter ungünstigen Bedingungen gut angeströmt wird. So sollte sich der Seekasten nicht dort befinden, wo sich die Strömung bei großen Driftwinkeln vom Rumpf ablöst.

Sofern keine konstruktiven Gründe dagegen sprechen, sollten zur Auslegung der Lage und Größe zunächst die numerischen Berechnungen der Schiffsumströmung oder entsprechende Modellversuche (Wollfäden, Farbanstrichversuche) herangezogen werden. Die numerischen Berechnungen haben hier den Vorteil, dass mit moderatem Aufwand auch die Schiffsumströmung bei Drift berechnet werden kann. Anhand der ermittelten Schiffsumströmung kann so eine geeignete Stelle gefunden werden. Die Größe des Seekastens ergibt sich aus dem notwendigen Volumenstrom und der Temperaturdifferenz. Hier können durchaus Verbesserungen

der Durchströmung erzielt werden, wenn die Öffnungen des Seekastens an die Stromlinien angepasst werden. Alle diese Untersuchungen sind notwendig, wenn eine Verbesserungen am Seekasten erzielt werden soll.

Deshalb wurden inzwischen (nicht in diesem Forschungsvorhaben) andere Kühlkonzepte entwickelt, die diese Nachteile aufheben. Eine Möglichkeit, einen ausreichendem Kühlwasserfluss sicherzustellen, besteht darin, das Wasser aktiv durch den Wärmetauscher strömen zu lassen. Das Kühlwasser wird durch eine relative kleine Öffnung von einer Pumpe angesaugt, durch einen Kühlkasten mit dem Wärmetauscher gedrückt und schließlich durch eine zweite Öffnung im Rumpf wieder außenbords gebracht. Diese erzwungene Kühlung hat den Vorteil, dass sie auch im Stand sehr wirkungsvoll ist. Die Öffnungen im Rumpf sind relativ klein, was aber auch die Gefahr birgt, dass sie verstopfen können. Dieses Verfahren kann so weit geführt werden, dass der Wärmetauscher direkt im Motor integriert ist. Auch hier sollten die Positionen der Ein- und Austrittsöffnungen mit Sorgfalt gewählt werden.

Ein anderer Ansatz ist es, die Schiffsaußenhaut als Wärmetauscher zu verwenden. In diesem Fall sitzen auf der Innenseite der Schiffsaußenhaut mit gutem thermischen Anschluss aufgesetzte Kühlschlangen, die die Wärme in die Außenhaut einbringen. Die Außenhaut wird umströmt und die Wärme durch Konvektion abgenommen. Aufgrund der etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Schiffbaustahls ist eine größere Fläche für die Wärmeübertragung erforderlich. Der Bau mit an die gekrümmte Hinterschiffsform angepassten Kühlrohren auf der Innenseite ist aufwendig. Dafür wird die Außenhaut nicht durchbrochen und es fließt kein Wasser in den Schiffsrumpf.

### **6.3 Verwertung der Ergebnisse**

Nach Abschluss der umfangreichen Untersuchungen muss festgestellt werden, dass sich das angestrebte, vereinfachte Auslegungsverfahren für die Anordnung von Bugstrahlanlagen und Seekästen nicht realisieren lässt. Die Unterschiede zwischen den Konfigurationen wirken sich so stark auf die Umströmung aus, dass eine vereinfachte Darstellung in Berechnungsformeln oder Diagrammen für beliebige Schiffe oder sogar für einen Schiffstyp quantitativ zu ungenau wäre.

Nichtsdestotrotz lassen sich die in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse beim Um- und Neubau von Binnenschiffen nutzen. Dazu werden zeitnah die wesentlichen Erkenntnisse aus diesem Forschungsvorhaben in einzelnen Aspekten – wie z. B. der Position der Ausströmkanäle, der Gestaltung der Austrittsöffnung, der die Ausrichtung und Größe der Öffnungen des Seekastens sowie der Position des Seekastens – für die Bedarfsträger aufbereitet und auf den Webseiten des DST bereitgestellt.

Als Ergebnis dieses Forschungsvorhabens haben sich viele Ansatzpunkte für weitere Forschung aufgezeigt. Mögliche Verbesserungen, sowohl bei Bugstrahlanlagen als auch bei Seekästen bzw. anderen Kühlungstechniken, kommen bis jetzt nicht zur Anwendung, weil diese mit höheren Bau- und Wartungskosten verbunden sind. Hier gilt es, Wege zu finden, wie bereits angedachte Konzepte so realisiert werden können, dass sie in der Binnenschiffahrt Akzeptanz finden, oder neue Lösungen zu finden, mit denen die aufgedeckten Nachteile bisheriger Konzepte überwunden werden können.

# Literaturverzeichnis

- [1] Courant, R., Friedrichs, K. und Lewy, H. „On the Partial Difference Equations of Mathematical Physics“. In: *IBM J. Res. Dev.* 11.2 (März 1967), Seiten 215–234.
- [2] Ferziger, J. H. und Peric, M. *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [3] Hirt, C. W. und Nichols, B. D. *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*, Los Alamos Scientific Laboratory report. 1981.
- [4] Hoekstra, M. *A RANS-based analysis tool for ducted propeller systems in open water condition*. Technischer Bericht. Maritime Research Institute Netherlands, 2006.
- [5] Hough, G. R. und Ordway, D. E. *The Generalized Actuator Disk*. Technical Report TAR-TR 6401. Therm Advanced Research, Inc., Jan. 1964.
- [6] Issa, R. „Solution of the Implicitly Discretized Fluid-Flow Equations by Operator-Splitting“. In: *Journal of Computational Physics* 62 (1986), Seiten 40–65.
- [7] Jasak, H. „Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows“. Imperial College London, 1996.
- [8] Jasak, H, Weller, HG und Gosman, AD. „High resolution NVD differencing scheme for arbitrarily unstructured meshes“. In: *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS* 31 (1999), Seiten 431–449.
- [9] Maric, T., Höpken, J. und Mooney, K. *The OpenFOAM Technology Primer*. Duisburg: Sourceflux, 2014.
- [10] Meagher, D. „Geometric modeling using octree encoding“. In: *Computer Graphics and Image Processing* 19.2 (1982), Seiten 129 –147.
- [11] Menter, F. R. „Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications“. In: *AIAA Journal* 32.8 (Aug. 1994), Seiten 1598–1605.

- [12] Pope, S.B. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [13] Popinet, Stephane. „Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries“. In: *Journal of Computational Physics* 190.2 (2003), Seiten 572 –600.
- [14] Procedures, ITTC Recommended und Guidelines. *Practical Guidelines for Ship CFD Applications*. Technischer Bericht. International Towing Tank, 2011.
- [15] Rusche, H. „Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions“. Imperial College London, 2002.
- [16] Schlichting, H., Krause, E., Gersten, K. und Oertel, H.J. *Grenzschicht-Theorie*. Springer, 2006.
- [17] Simonsen, C. D. und Stern, F. „RANS Maneuvering Simulation of Esso Osaka With Rudder and a Body-Force Propeller“. In: *Journal of Ship Research* 49.2 (Juni 2005), Seiten 98–120.
- [18] Tryggvason, G., Scardovelli, Ruben und Zaleski, S. *Direct Numerical Simulation of Gas–Liquid Multiphase Flows*. Cambridge University Press, 2011.
- [19] Ubbink, O. „Numerical Prediction of Two Fluid Systems with Sharp Interfaces“. Imperial College London, 1997.
- [20] WSV. *Zulassungskriterien für Einzelfahrer auf dem Main und dem Main-Donau-Kanal*. Technischer Bericht. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd, 2011.
- [21] Weller, H.G. *A New Approach to VOF-based Interface Capturing Methods for Incompressible and Compressible Flow*. Technischer Bericht. OpenCFD, 2008.
- [22] Weller, H.G. *Bounded Explicit and Implicit Second-Order Schemes for Scalar Transport*. Technischer Bericht. OpenCFD, 2006.
- [23] Weller, H.G. *Pressure-Velocity Solution Algorithms for Transient Flows*. Technischer Bericht. OpenCFD, 2005.

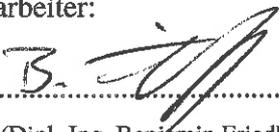
**EINLASS**

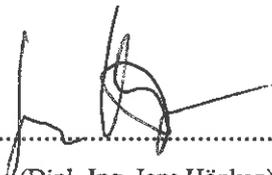
**Entwicklung von ingenieurmäßigen, numerischen Lösungen für die Auslegung von  
Seekästen und Strahlrudern**

Duisburg, im Mai 2015

Fachbereich Schiffshydrodynamik

Bearbeiter:

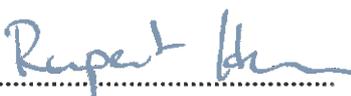
  
.....  
(Dipl.-Ing. Benjamin Friedhoff)

  
.....  
(Dipl.-Ing. Jens Höpken)

Bearbeiter und Projektleiter:

  
.....  
(Dipl.-Math. Rainer Kaiser)

DST – Entwicklungszentrum für  
Schiffstechnik und Transportsysteme e.V.

  
.....  
(Dr.-Ing. Rupert Henn)