



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Maßnahmen für effizientere RANSE-Simulationen zur Leistungsprognose von Schiffen**

Bachelorthesis

**Felix Reichert**

Matr.-Nr.: 1932414

1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Peter Wulf  
2. Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Schmode  
Abgabedatum: 28. Februar 2012

Felix Reichert  
Sanddornstieg 11  
22889 Tangstedt

Tel.: +49 173 2120507  
E-Mail: [felix.reichert@haw-hamburg.de](mailto:felix.reichert@haw-hamburg.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Schiffsbewegungen . . . . .	3
2.1.1 Schwingungen im Allgemeinen . . . . .	4
2.1.2 Tauchschwingungen . . . . .	6
2.1.3 Stampfschwingungen . . . . .	7
2.2 Glatwasserwiderstand . . . . .	8
2.2.1 Wellenwiderstand . . . . .	9
2.2.2 Reibungswiderstand . . . . .	11
2.2.3 Froudesche Zahl . . . . .	13
2.3 Numerische Strömungsmechanik . . . . .	13
2.3.1 Kontinuitätsgleichung . . . . .	13
2.3.2 <i>RANSE</i> . . . . .	14
2.3.3 Mehrphasenströmung . . . . .	15
2.3.4 Zusätzlicher Quellterm mittels Volumenkraft . . . . .	15
2.3.5 Abbilden von Lösungen . . . . .	15
2.4 Mathematische Grundlagen . . . . .	16
2.4.1 Mittelwert . . . . .	16
2.4.2 Standardabweichung . . . . .	16
2.4.3 Lineare Regressionsanalyse . . . . .	17
2.4.4 Bilineare Interpolation . . . . .	17
<b>3 Berechnungsgrundlagen</b>	<b>19</b>
3.1 Schiffsdaten . . . . .	19
3.2 Netzgenerierung . . . . .	20
3.3 Variationen der Anströmgeschwindigkeiten . . . . .	22

---

3.3.1	Originalmaßstab . . . . .	22
3.3.2	Modellmaßstab . . . . .	23
3.3.3	Turbulente Grenzschicht . . . . .	23
3.4	Parametereinstellungen . . . . .	24
3.4.1	<i>sixDof</i> -Lösungsverfahren . . . . .	24
3.4.2	Randbedingungen . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Simulation</b>	<b>25</b>
4.1	Dämpfung der Störwellen im Berechnungsgebiet . . . . .	25
4.1.1	Motivation - IST-Zustand . . . . .	25
4.1.2	Vorgehensweise . . . . .	25
4.2	Dämpfung der Schiffsbewegungen . . . . .	27
4.2.1	Motivation - IST-Zustand . . . . .	27
4.2.2	Vorgehensweise . . . . .	27
4.3	Übertragen von Lösungen auf feinere Berechnungsgitter . . . . .	30
4.3.1	Motivation - IST-Zustand . . . . .	30
4.3.2	Vorgehensweise . . . . .	30
4.3.3	Berechnungsüberwachung mit Abbruchkriterium . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>35</b>
5.1	Dämpfung der Störwellen im Berechnungsgebiet . . . . .	35
5.1.1	Originalmaßstab . . . . .	35
5.1.2	Modellmaßstab . . . . .	38
5.1.3	Zusammenfassung . . . . .	38
5.2	Dämpfung der Schiffsbewegungen . . . . .	38
5.2.1	Originalmaßstab . . . . .	38
5.2.2	Modellmaßstab . . . . .	40
5.2.3	Zusammenfassung . . . . .	40
5.3	Übertragen von Lösungen auf feinere Berechnungsgitter . . . . .	40
5.3.1	Finden eines geeigneten Abbruchkriteriums . . . . .	40
5.3.2	Übertragen von Lösungen im Originalmaßstab . . . . .	41
5.3.3	Optimierung der Abbruchkriterien . . . . .	44
5.3.4	Übertragen von Lösungen im Modellmaßstab . . . . .	46
5.3.5	Bewertung der Benutzung von Abbruchkriterien . . . . .	47
5.3.6	Zusammenfassung . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>51</b>
	<b>Literatur</b>	<b>71</b>

# Aufgabenstellung

Die Vorhersage der erforderlichen Leistung von Schiffen ist ein Kernproblem im Schiffbau. Traditionell wird hierzu ein Modellversuch in einem Schlepptank benutzt. Durch den Fortschritt in der Rechentechnik wird zunehmend die numerische Simulation (CFD = computational fluid dynamics) im „numerischen Schlepptank“ als Alternative in Erwägung gezogen. Die erforderlichen Rechenzeiten sind allerdings bislang für viele Industrieprojekte zu lang. Dies liegt u.a. an dem verwendeten Verfahren, die viskose Strömungen mit freier Oberfläche und a priori unbekannter Position des Schiffes als Anfahrvorgang zu simulieren. Dabei kommt es zu Oszillationen der Schiffslage und überlagerten Störwellen, die erst nach langen Simulationszeiten verschwinden.

Im Rahmen der Bachelorthesis sollen nun verschiedene Ansätze untersucht und dokumentiert werden, die störenden Oszillationen schneller zu dämpfen und somit signifikant schnellere Prognosen (auf gleicher Hardware) zu ermöglichen. Als Anwendungsfall wird ein typisches Containerschiff genommen.

Im Rahmen der Bachelorthesis sind die folgenden Aufgabenpakete zu behandeln:

- Abbilden („mapping“) von Lösungen, die auf groben Gittern mit hoher Konvergenz erzeugt wurden, auf ein feineres Netz
- Wellendämpfung mit einem Ansatz unter Benutzung von „body forces“, die eventuell im Laufe der Simulation veränderlich anzusetzen sind. Eine entsprechende Idee ist auszuformulieren, in ein Makro in OpenFOAM umzusetzen, zu testen und zu dokumentieren
- Dämpfung der dynamischen Tiefertauchung und Vertrimmung zur Verringerung der Störschwingungen. Dabei ist die Dämpfung eventuell im Laufe der Simulation veränderlich anzusetzen. Eine entsprechende Idee ist auszuformulieren, in ein Makro in OpenFOAM umzusetzen, zu testen und zu dokumentieren
- Dokumentation der Verfahren und Ergebnisse

Die Arbeit soll zu Empfehlungen führen, die sich verallgemeinern lassen. Insbesondere sind bei Parameter-Empfehlungen Skaleneffekte (Werte für Schiffsmodele in der Größenordnung von 5 bis 10 m und Werte für große Schiffe (100 bis 400 m)) zu berücksichtigen. Die vorgeschlagenen Veränderungen am Rechenprozess sollten die Rechenzeit verkürzen ohne die Ergebnisse (Widerstand, Trimm, Absenkung) signifikant zu verändern.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Freiheitsgrade eines Schiffes [2] . . . . .	4
2.2	Gedämpfter Feder-Masse-Schwinger [6] . . . . .	4
2.3	Tauchschwingung [2] . . . . .	6
2.4	Stampfen [2] . . . . .	7
2.5	Primärwellensystem [3] . . . . .	10
2.6	Sekundärwellensystem [3] . . . . .	11
2.7	Turbulente Grenzschicht an einer ebenen Wand [9] . . . . .	12
2.8	Variablentransfer vom groben auf das feinere Gitter (Interpolation) [5] . . . . .	16
2.9	Variablentransfer durch Interpolation, detailliert . . . . .	18
3.1	Verwendeter Schiffsrumpf . . . . .	19
3.2	Detailansicht der Verfeinerung am Bug . . . . .	21
5.1	Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen mit bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	36
5.2	Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen mit bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	37
A.1	Gitterverformung . . . . .	51
A.2	Randbedingungen . . . . .	51
A.3	<i>Layer</i> -Schicht am Bug des Schiffes . . . . .	52
A.4	Verfeinerung Gitter 1 . . . . .	52
A.5	Verfeinerung Gitter 2 . . . . .	53
A.6	Verfeinerung Gitter 3 . . . . .	53
A.7	Erhebung der freien Oberfläche bei 24.90 <i>kn</i> , FS und den 1. Wellendämpfungsparametern (gemäß Tabelle 4.1) . . . . .	54
A.8	Erhebung der freien Oberfläche bei 24.90 <i>kn</i> , FS und den 7. Wellendämpfungsparametern (gemäß Tabelle 4.1) . . . . .	54
A.9	Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen bei 12.45 <i>kn</i> und MS	55
A.10	Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen bei 24.90 <i>kn</i> und MS	55
A.11	Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	56
A.12	Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	56
A.13	Optimierte Tauchbewegung bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	57

A.14 Optimierte Stampfbewegung bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	57
A.15 Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	58
A.16 Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	58
A.17 Optimierte Tauchbewegung bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	59
A.18 Optimierte Stampfbewegung bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	59
A.19 Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 <i>kn</i> und MS . . . . .	60
A.20 Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 <i>kn</i> und MS . . . . .	60
A.21 Optimierte Tauchbewegung bei 12.45 <i>kn</i> und MS . . . . .	61
A.22 Optimierte Stampfbewegung bei 12.45 <i>kn</i> und MS . . . . .	61
A.23 Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 <i>kn</i> und MS . . . . .	62
A.24 Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 <i>kn</i> und MS . . . . .	62
A.25 Optimierte Tauchbewegung bei 24.90 <i>kn</i> und MS . . . . .	63
A.26 Optimierte Stampfbewegung bei 24.90 <i>kn</i> und MS . . . . .	63
A.27 Widerstandskraft bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	64
A.28 Tauchen bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	64
A.29 Stampfen bei 12.45 <i>kn</i> und FS . . . . .	64
A.30 Widerstandskraft bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	65
A.31 Tauchen bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	65
A.32 Stampfen bei 24.90 <i>kn</i> und FS . . . . .	65
A.33 Widerstandskraft bei 24.90 <i>kn</i> und FS nach Optimierung . . . . .	66
A.34 Tauchen bei 24.90 <i>kn</i> und FS nach Optimierung . . . . .	66
A.35 Stampfen bei 24.90 <i>kn</i> und FS nach Optimierung . . . . .	66
A.36 Widerstandskraft bei 24.90 <i>kn</i> und FS nach erneuter Optimierung . . . . .	67
A.37 Tauchen bei 24.90 <i>kn</i> und FS nach erneuter Optimierung . . . . .	67
A.38 Stampfen bei 24.90 <i>kn</i> und FS nach erneuter Optimierung . . . . .	67
A.39 Widerstandskraft bei 12.45 <i>kn</i> und MS . . . . .	68
A.40 Tauchen bei 12.45 <i>kn</i> und MS . . . . .	68
A.41 Stampfen bei 12.45 <i>kn</i> und MS . . . . .	68
A.42 Widerstandskraft bei 24.90 <i>kn</i> und MS . . . . .	69
A.43 Tauchen bei 24.90 <i>kn</i> und MS . . . . .	69
A.44 Stampfen bei 24.90 <i>kn</i> und MS . . . . .	69

# Tabellenverzeichnis

3.1	Schiffsparameter . . . . .	19
3.2	Physikalische Konstanten . . . . .	20
3.3	<i>BlockMesh</i> -Dimensionierung . . . . .	20
4.1	Parametereinstellung für die Untersuchung der Wellendämpfung . . . . .	26
4.2	Parametereinstellung für die Untersuchung der Schiffsdämpfung . . . . .	30
4.3	Zellenanzahl der Berechnungsgitter . . . . .	31
5.1	Ausgewählte Wellendämpfungsparameter zur Visualisierung . . . . .	35
5.2	CPU-Zeit pro Simulation in Stunden mit FS . . . . .	43
5.3	Abbruchkriterien in Prozent des Mittelwertes für die einzelnen Berechnungsgitter . . . . .	44
5.4	CPU-Zeit pro Simulation bei $v = 24.90 \text{ kn}$ und FS nach Optimierungsversuch . . . . .	45
5.5	Abbruchkriterium in Prozent des Mittelwertes für das 4. Berechnungsgitter	45
5.6	CPU-Zeit pro Simulation bei $v = 24.90 \text{ kn}$ und FS mit Variation der Abbruchkriterien . . . . .	46
5.7	CPU-Zeit pro Simulation in Stunden mit MS . . . . .	47



# Formelzeichen

## Lateinische Formelzeichen

$A_w$	$m^2$	Wasserlinienfläche
$B_S$	$m$	Breite des Schiffes
$\vec{B}F$	$N$	Volumenkraft
$d$	$kg\ s^{-1}$	translatorische Dämpfungskonstante
$d_\psi$	$Nm\ s^{-1}$	rotatorische Dämpfungskonstante
$D$	–	Lehr'sches Dämpfungsmaß
$D_S$	$m$	Wassertiefe
$c$	$Nm^{-1}$	Federkonstante
$c_\psi$	$Nm$	Stampfkonstante
$F$	$N$	Kraft
$F_{hs}$	$N$	hydrostatische Auftriebskraft
$F_g$	$N$	Schwerkraft
$Fr$	–	Froudesche Zahl
$g$	$m\ s^{-2}$	Erdbeschleunigung
$G$	–	Übertragungsfunktion
$h$	$m$	Höhe
$I_{yy}$	$kg\ m^2$	Massenträgheitsmoment
$k_{ps}$	–	Proportionalitätskonstante
$k_{yy}$	$m$	Trägheitsradius
$l_t$	$m$	turbulente freie Weglänge
$L_{pp}$	$m$	Schiffsreferenzlänge (engl.: Length between perpendiculars)
$m$	$kg$	Masse
$m_S$	$kg$	Schiffsmasse
$\dot{m}$	$kg\ s^{-1}$	Massenstrom
$M_{yy}$	$Nm$	Moment um die y-Achse
$nProc$	–	Anzahl der Prozessoren
$p$	$Nm^{-2}$	Druck
$Re$	–	Reynolds-Zahl
$t$	$s$	Zeit
$T$	$s$	Periodendauer
$T_s$	$m$	Tiefgang des Schiffes
$s$	–	Laplace-Operator

$u$	$ms^{-1}$	charakteristische Strömungsgeschwindigkeit in $x$ -Richtung
$v$	$ms^{-1}$	charakteristische Strömungsgeschwindigkeit in $y$ -Richtung
$VAR$		Varianz
$w$	$ms^{-1}$	charakteristische Strömungsgeschwindigkeit in $z$ -Richtung
$X$	–	Eingangssignal
$Y$	–	Ausgangssignal

## Griechische Formelzeichen

$\alpha$	–	Zellfüllgrad
$\gamma$	–	Dämpfungsintensität
$\gamma_y$	$s$	Dämpfungszeit für Stampfbewegungen
$\gamma_z$	$s$	Dämpfungszeit für Tauchbewegungen
$\delta$	$s^{-1}$	Abklingkoeffizient
$\eta_t$	$kg\,m^{-1}\,s^{-1}$	Scheinviskosität
$\lambda$	–	Skalenfaktor
$\lambda_w$	$m$	Wellenlänge
$\nu$	$m^2\,s^{-1}$	kinematische Viskosität
$\rho$	$kg\,m^{-3}$	Dichte
$\sigma$		Standardabweichung
$\tau_w$	$Nm^{-2}$	Wandschubspannung
$\tau_t$	$Nm^{-2}$	turbulente Schubspannung
$\psi$	$^\circ$	Stampfwinkel
$\omega_0$	$s^{-1}$	Kreiseigenfrequenz

---

# 1 Einführung

Bisher wurde die Leistungsprognose von Schiffen in einem Schleppkanal durchgeführt. Dies ist teuer und aufwendig. Eine neue heranwachsende Methode ist die Berechnung mit numerischer Strömungsmechanik (engl.: **C**omputational **F**luid **D**ynamics, CFD) mit Hilfe von *RANSE*-Simulationen (engl.: **R**eynolds **A**veraged **N**avier **S**tokes **E**quation).

Für die Leistungsprognose von Schiffen sind viele verschiedene Berechnungen mit enorm großer Rechenleistung erforderlich. Daraus resultiert eine hohe Rechenzeit. Diese Rechenzeit soll weitestgehend minimiert werden. Um dies zu gewährleisten, werden in dieser Bachelorthesis einige Optimierungsansätze untersucht und bewertet.

Das Starten von Berechnungen zur Leistungsprognose von Schiffen bringt oft überlagerte Störwellen mit sich, die die Widerstandskräfte manipulieren. Aus diesem Grund müssen Störwellen vermieden oder beseitigt werden. Erreicht werden kann dies über eine künstliche Dämpfung der unphysikalischen Wellen im Berechnungsgebiet mit Hilfe von Volumenkräften.

Die Schwimmlage eines Schiffes ändert sich dynamisch. Zu schnelle Änderungen können Störungen im Berechnungsgebiet hervorrufen, wie beispielsweise neu entstehende Störwellen. Schiffsbewegungen müssen künstlich gedämpft ablaufen um diese Störungen zu vermeiden.

Das Rechnen auf lediglich einem feinen Berechnungsgitter ist sehr zeitintensiv. Lösungen von groben Gittern, die relativ schnell zu einer stationären Lösung führen, können auf ein feineres Gitter übertragen werden. Der Test von optimalen Abbruchkriterien für verschiedene Gittergrößen könnte eine wesentlich schnellere Berechnung mit sich bringen.



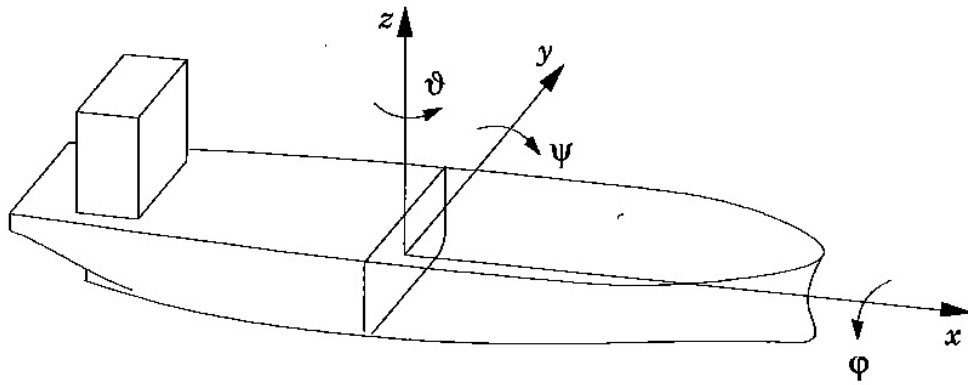
## 2 Theorie

### 2.1 Schiffsbewegungen

Ein im Wasser befindliches Schiff ist ein frei beweglicher Körper, der sich in allen sechs Freiheitsgraden bewegen kann. Dabei handelt es sich um die translatorischen Bewegungen in Richtung der  $x$ -,  $y$ -, und  $z$ -Achse und die rotatorischen Bewegungen um diese Achsen. Das im Schiffbau gebräuchliche Koordinatensystem ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Hierbei zeigt die  $x$ -Achse entlang der Schiffslängsachse und positiv in Richtung des Bugs verläuft. Die  $y$ -Achse zeigt positiv in Richtung der Backbordseite und verläuft entlang der Querachse. Die  $z$ -Achse verläuft entlang der Hochachse des Schiffes und verläuft positiv in Richtung der Aufbauten. Dabei liegt der Ursprung des Koordinatensystems, um die Bewegungen eines Schiffes zu beschreiben, im Schwerpunkt. Wird lediglich die Konstruktion des Schiffes betrachtet, liegt der Ursprung des Koordinatensystems allerdings im hinteren Lot auf Höhe der Basis in der Schiffsmittle. Die Richtungen der Achsen bleiben dabei die gleichen.

$x$ -Richtung	<b>Längsbewegung</b>
$y$ -Richtung	<b>Querbewegung</b>
$z$ -Richtung	<b>Tauchen</b>
Drehung um $x$ -Achse( $\phi$ )	<b>Rollen</b>
Drehung um $y$ -Achse( $\psi$ )	<b>Stampfen</b>
Drehung um $z$ -Achse( $\tau$ )	<b>Gieren</b>

Damit sich bei einem Schiff eine stationäre Schwimmlage einstellt, muss in erster Linie die Gewichtskraft des Schiffes  $F_g$  gleich der hydrodynamischen Auftriebskraft  $F_{hs}$  sein (Archimedisches Prinzip). Des Weiteren müssen der Gewichtsschwerpunkt und der Auftriebsschwerpunkt auf einer vertikalen Wirkungslinie liegen. Das Schiff strebt dabei immer einen Gleichgewichtszustand an. Bei der Fahrt des Schiffes verändern sich die äußeren Umstände. Dabei führt eine Veränderung des Tiefgangs oder des Wellenbildes am Rumpf zu einer Veränderung des eingetauchten Volumens, wobei sich der Auftriebsschwerpunkt verschiebt und das Schiff in Richtung eines neuen, anderen Gleichgewichtszustandes strebt.

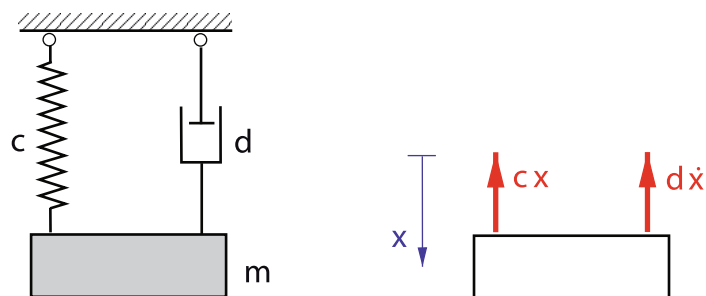


**Abbildung 2.1:** Freiheitsgrade eines Schiffes [2]

Berücksichtigt werden bei dieser Bachelorthesis lediglich die Längsbewegung in  $x$ -Richtung, die Bewegung entlang der  $z$ -Achse und die Drehung um die  $y$ -Achse des Schiffes. Begründet ist dies durch den bei der Leistungsprognose ermittelten Glattwasserwiderstand, welcher bei stationärer Fahrt ermittelt wird. Natürlicher Seegang oder das Manövrieren des Schiffes werden hierbei nicht berücksichtigt. Die Längsbewegung in  $x$ -Richtung beschreibt die Fahrtrichtung und wird durch die Wasseranströmung simuliert. Dynamische Bewegungen treten bei der Widerstandsberechnung von Schiffen ausschließlich beim Anfahrvorgang auf, im Tauchen und Stampfen des Schiffes. Diese Bewegungen sind gedämpfte Schwingungen durch eine viskose Flüssigkeitsreibung des Wassers und werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

### 2.1.1 Schwingungen im Allgemeinen

Zur Beschreibung der Tauch- und Stampfschwingung eines Schiffes, ist es sinnvoll, zunächst einen Feder-Masse-Schwinger zu betrachten. Dieses Modell beschreibt die Schiffsbewegung unter Berücksichtigung der viskosen Flüssigkeitsreibung und ist hinreichend genau, sofern das Schiff als starrer Körper betrachtet wird. [2]



**Abbildung 2.2:** Gedämpfter Feder-Masse-Schwinger [6]

Die allgemeine Gleichgewichtsbedingung für die in Abbildung 2.2 dargestellte gedämpfte

Schwingung ist über Gleichung (2.1) definiert.

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + cx = 0 \quad (2.1)$$

Zunächst sollte die freie ungedämpfte Schwingung eingeführt werden.

$$m\ddot{x} + cx = 0 \quad (2.2)$$

Durch den Lösungsansatz  $x = \hat{X} (\sin \omega_D t + \varepsilon)$  dieser Differenzialgleichung (Abk. DGL) ergibt sich die Kreiseigenfrequenz des Systems.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (2.3)$$

Über das Einsetzen dieser Kreiseigenfrequenz und des Abklingkoeffizienten  $\delta = d/2m$  in die Gleichung (2.1), resultiert die Gleichung (2.4).

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2.4)$$

Durch die Lösung dieser DGL mit dem Lösungsansatz von  $x = \hat{X} e^{-\delta t} (\sin \omega_D t + \varepsilon)$  und der Kreiseigenfrequenz aus Gleichung (2.3) ergibt sich die Kreiseigenfrequenz des gedämpften Systems aus Abbildung 2.2.

$$\omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - D^2} \quad (2.5)$$

Dabei ist das Lehr'sche Dämpfungsmaß  $D$  durch  $\delta/\omega_0$  definiert. Im Allgemeinen ist das Dämpfungsmaß sehr klein. Betrachtet man ausschließlich die Kreiseigenfrequenz, kann die Dämpfung vernachlässigen werden. Hierbei gilt, dass  $\omega_D$  ungefähr gleich  $\omega_0$  ist (siehe Gleichung (2.6)) [2].

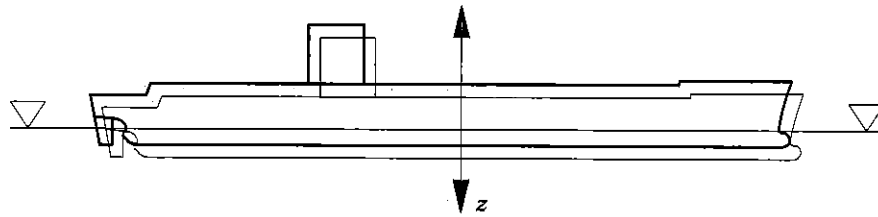
$$\omega_D \approx \omega_0 \quad (2.6)$$

Die Periodendauer einer Schwingung ist letztendlich über Gleichung (2.7) zu ermitteln.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (2.7)$$

## 2.1.2 Tauchschwingungen

Die Tauchschwingung eines Schiffes beschreibt die Bewegung entlang der  $z$ -Achse und wird meist nur Tauchen genannt (vgl. Abbildung 2.3). Durch die Veränderung des Wellenbildes am Schiffsrumpf verändert sich das eingetauchte Volumen und damit die Auftriebskraft. Hierbei entsteht eine Differenz zwischen der Schwerkraft und der veränderten Auftriebskraft. Damit ein Gleichgewichtszustand erreicht wird, muss sich das Schiff entlang der  $z$ -Achse bewegen. Diese Bewegung erfolgt mittels einer gedämpften Schwingung.



**Abbildung 2.3:** Tauchschwingung [2]

Die Rückstellkraft beim Tauchen eines Schiffes ist im Allgemeinen durch die Gleichung (2.8) definiert.

$$c \cdot z = \rho_W g A_W(z) \cdot z \quad (2.8)$$

Dabei ist  $A_W$  die Wasserlinienfläche. Diese ist abhängig von der Tiefertauchung des Schiffes. Sie kann als konstant betrachtet werden, bei der Annahme, dass das Schiff lediglich mit kleinen Amplituden schwingt. Es folgt für die Federkonstante die Gleichung (2.9).

$$c = \rho_W g A_W \quad (2.9)$$

Die Massenkraft setzt sich aus der beschleunigten Schiffsmasse und dem durch die Bewegung beschleunigten Wasser zusammen (siehe Gleichung (2.10)). Die Schiffsmasse berechnet sich aus der Auftriebskraft des Schiffes durch die Erdbeschleunigung ( $m_S = F_{hs}/g$ ). Die hydrodynamische Masse  $m_{Hy}$  kann in grober Näherung gleich der Schiffsmasse gesetzt werden [2]. Dies ist für die hier verwendete Abschätzung der Eigenfrequenz hinreichend genau.

$$m\ddot{z} = (m_S + m_{Hy})\ddot{z} = 2m_S\ddot{z} \quad (2.10)$$



Durch Einsetzen der Federkonstante aus Gleichung (2.9) und des Ansatzes der beschleunigten Masse aus Gleichung (2.10) in die allgemeine Formel zur Berechnung der Kreiseigenfrequenz (Gleichung (2.3)) ergibt sich die Kreiseigenfrequenz für die Tauchschwingung des Schiffes.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho_w g A_W}{2 \cdot m_S}} \quad (2.11)$$

### 2.1.3 Stampfswingungen

Das Stampfen beschreibt die Rotation um die  $y$ -Achse mit dem Winkel  $\psi$ . Die allgemeine Differenzialgleichung dieser Rotationsschwingung ist in Gleichung (2.12) definiert. Die Rotation tritt auf, wenn der Schwerpunkt  $G$  und der Angriffspunkt der Auftriebskraft  $B_\psi$  nicht auf einer Wirkungslinie liegen (siehe Abbildung 2.4).

$$I_{yy} \ddot{\psi} + d_\psi \dot{\psi} + c_\psi \psi = 0 \quad (2.12)$$

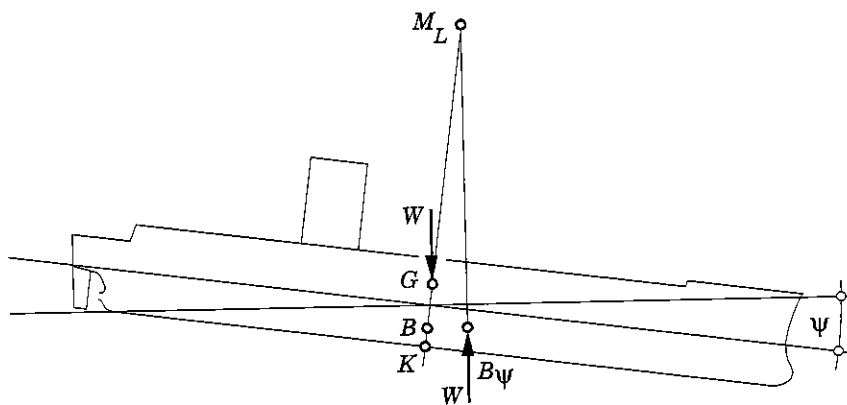


Abbildung 2.4: Stampfen [2]

Das Rückstellmoment ist über Gleichung (2.13) definiert. Es wird die Vereinfachung getroffen, dass die Strecke  $\overline{BG}$  klein gegenüber der Strecke  $\overline{BM_L}$  ist und aus diesem Grund vernachlässigt werden kann [2].

$$c_\psi \cdot \psi = m_S (\overline{BM_L} - \overline{BG}) \cdot \psi \approx m_S \overline{BM_L} \cdot \psi \quad (2.13)$$

Die Stampfkonstante  $c_\psi$  ist über Gleichung (2.14) definiert. Ähnlich wie in Abschnitt 2.1.2 setzt sich das für die Stampfkonstante relevante Massenträgheitsmoment

mit Hilfe der bewegten Schiffsmasse und der durch die Bewegung beschleunigten Wassermasse zusammen (Gleichung (2.15)).

$$c_{\psi} = \rho_W g I_{yy} \quad (2.14)$$

$$I_{yy} \ddot{\psi} = (I_{yy,S} + I_{yy,H_y}) \ddot{\psi} \quad (2.15)$$

Mittels Gleichung (2.16) berechnet sich das Massenträgheitsmoment des Schiffes  $I_{yy,S}$ . Dabei kann angenommen werden, dass der Trägheitsradius eines Schiffes näherungsweise bei  $k_{yy}^2 = 0.25 \cdot L_{pp}$  liegt [2]. Das hydrodynamische Massenträgheitsmoment kann nur sehr kompliziert ermittelt werden. Eine genaue Berechnung ist in der Bachelorthesis allerdings nicht erforderlich. Aus diesem Grund wird die Berechnung vereinfacht wie in Gleichung (2.17) angenommen [2].

$$I_{yy,S} = m_S \cdot k_{yy}^2 \quad (2.16)$$

$$I_{yy,H_y} = 0.5 \cdot I_{yy,S} \quad (2.17)$$

In Verbindung mit Kreiseigenfrequenz aus Gleichung (2.3) resultiert für die Kreiseigenfrequenz der Stampfschwingung die Gleichung (2.18). Auch in diesem Fall kann für die Ermittlung der Kreiseigenfrequenz die Dämpfung vernachlässigt werden.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_{\psi}}{1.5 \cdot I_{yy,S}}} \quad (2.18)$$

Wird der Stampfwinkel  $\psi$  auf die Länge des Schiffes  $L_{pp}$  bezogen ergibt sich die sogenannte Vertrimmung des Schiffes. Diese gibt den Höhenunterschied zwischen Bug und Heck wieder.

Eine ausführliche Beschreibung der Schiffsbewegungen ist in [2] zu finden. Des Weiteren gibt [6] einen guten Überblick über allgemeine Schwingungen.

## 2.2 Glattwasserwiderstand

Für die Leistungsprognose von Schiffen wird der Glattwasserwiderstand untersucht. Dies kann meist nur sehr ungenau erfolgen, da der Widerstand des Schiffes verglichen mit seiner Masse sehr gering ist. Die Widerstandsbeiwerte eines Schiffes liegen im Bereich von 0.03 bis 0.05 [7]. Gebildet wird der Glattwasserwiderstand aus mehreren Widerstandsanteilen, dabei spielen jedoch zwei eine sehr gewichtige Rolle:

- der Wellenwiderstand
- der Reibungswiderstand

Diese beiden Widerstände sollen im Folgenden näher beschrieben werden. Eine ausführlichere Beschreibung dieses Themas ist in [7] zu finden.

### 2.2.1 Wellenwiderstand

Ein wesentlicher Anteil des Schiffswiderstandes ist der Wellenwiderstand. Bei der Beobachtung eines fahrenden Schiffes fällt auf, dass sich am Rumpf des Schiffes nahezu stationäre Wellen bilden, auch Primärwellen genannt. Des Weiteren sind hinter dem Schiff Wellen zu erkennen, welche als Sekundärwellen bezeichnet werden. Die für die Bildung der eben genannten Wellen benötigte Wellenenergie muss vom Schiff erzeugt worden sein. Um die Wellenbildung beschreiben zu können, sind zunächst die Annahmen zu treffen, dass es sich um eine reibungsfreie, wirbelfreie und inkompressible Strömung handelt. Diese Eigenschaften gelten bei der sogenannten Potentialströmung. Die Entstehung dieser Wellen können mit der Kontinuitäts- und der Bernoulli-Gleichung erklärt werden.

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass die Masse erhalten bleibt und nicht vernichtet oder geschaffen werden kann. Mit der eben getroffenen Annahme, dass die Strömung inkompressibel ist, setzt man voraus, dass die Dichte konstant bleibt. Damit ist der Faktor  $\rho \cdot A$  in der Kontinuitätsgleichung (Gleichung (2.19)) eine Konstante und folglich muss sich die Geschwindigkeit verändern, damit die Masse an jedem Punkt konstant bleibt.

$$\dot{m} = \rho u_i A_i \quad (2.19)$$

Für ein Schiff bedeutet dies im Umkehrschluss, je breiter und tiefer das Schiff ist, desto größer ist die lokale Strömungsgeschwindigkeit. Das liegt an der Tatsache, dass das Schiff der Strömung den Weg versperrt und sie außen entlang fließen muss, anstatt die direkte Bahn nehmen zu können.

Die Bernoulli-Gleichung hingegen berücksichtigt die vorliegenden Energieformen und bilanziert diese. Dabei spielen die potentielle und die kinetische Energie, sowie der vorherrschende Druck eine Rolle. Mit der Annahme der reibungsfreien Strömung ist der Übergang von einer Energieform in eine andere als verlustfrei zu betrachten, womit die Bernoulli-Gleichung in Gleichung (2.20) gilt.

$$p_1 + \frac{\rho}{2} u_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} u_2^2 + \rho g h_2 \quad (2.20)$$

## Primärwellensystem

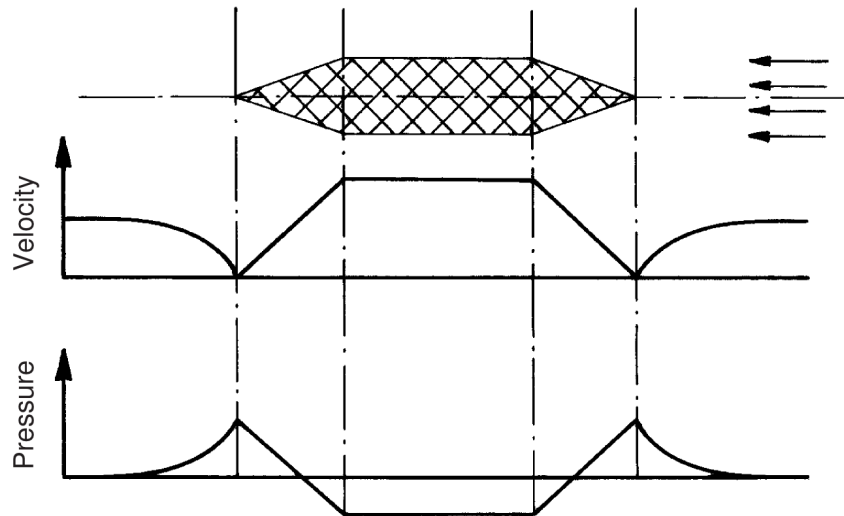


Abbildung 2.5: Primärwellensystem [3]

Betrachtet wird ein Schiff in Wasserlinienansicht (Abbildung 2.5), wobei die Geschwindigkeit und der Druck entlang des Schiffes aufgezeigt sind. Dabei ist die betrachtete Wasserlinie zunächst mit konstanter Höhe anzunehmen. Am Bug herrscht Staudruck, da die direkt senkrecht auf den Bug laufende Stromlinie ihre kinetische Energie in Druckenergie umwandelt. Es entsteht also ein Überdruck. Für die Geschwindigkeit heißt dies, dass die lokale Strömungsgeschwindigkeit am Bug kleiner ist, als die Fahrtgeschwindigkeit des Schiffes. Unter Berücksichtigung der eben eingeführten Kontinuitätsgleichung nimmt die Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmender Schiffsbreite zu, wobei der Druck abnimmt. Ein Druckminimum entsteht jeweils auf der Höhe der vorderen und hinteren Schulter des Schiffes.

Mit der zuvor angenommenen konstanten Höhe der Wasserlinie müsste mit einer Änderung der Geschwindigkeit eine Änderung des Druckes einhergehen (Bernoulli-Gleichung). Jedoch muss an der Oberfläche immer der Luftdruck  $p_\infty$  herrschen. Weiterhin gilt die Inkompressibilität der Strömung. Aus diesen Gründen muss sich zwangsläufig die Höhe im Term der kinetischen Energie bei einer Änderung der Strömungsgeschwindigkeit verändern. Daraus folgt, dass sich bei einer geringen Strömungsgeschwindigkeit an Stellen mit Staudruck ein Wellenberg bildet. Entgegengesetzt dazu bildet sich an Stellen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit und Druckminimum ein Wellental.

Das so entstehende Wellensystem nennt man Primärwellensystem. Die Wellenlänge kann über Gleichung (2.21) errechnet werden und ist damit direkt abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit. Das Primärwellensystem schlägt sich nur indirekt durch Stampfen und Tauchen auf den Wellenwiderstand nieder. Die dabei entstandenen bewegten Druckpunkte mit minimalen und maximalen Drücken bilden ein Sekundärwellensystem mit derselben Wellenlänge, welches stromabwärts verläuft.

$$\lambda_W = 2 \pi Fr^2 L_{pp} \quad (2.21)$$

## Sekundärwellensystem

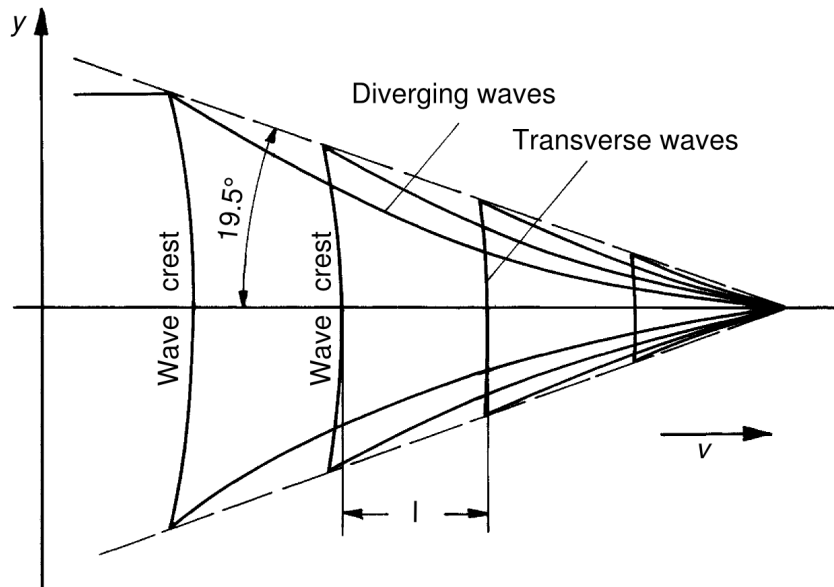


Abbildung 2.6: Sekundärwellensystem [3]

Das Sekundärwellensystem bildet den Hauptanteil des Wellenwiderstandes. Nach Kelvin (1824) wird durch einen bewegten Druckpunkt an der Wasseroberfläche ein Wellensystem wie in Abbildung 2.6 erzeugt. Um dieses Wellensystem durchgängig zu erhalten, ist es notwendig, die für die Bildung der Wellen benötigte Energie durchgehend zuzuführen.

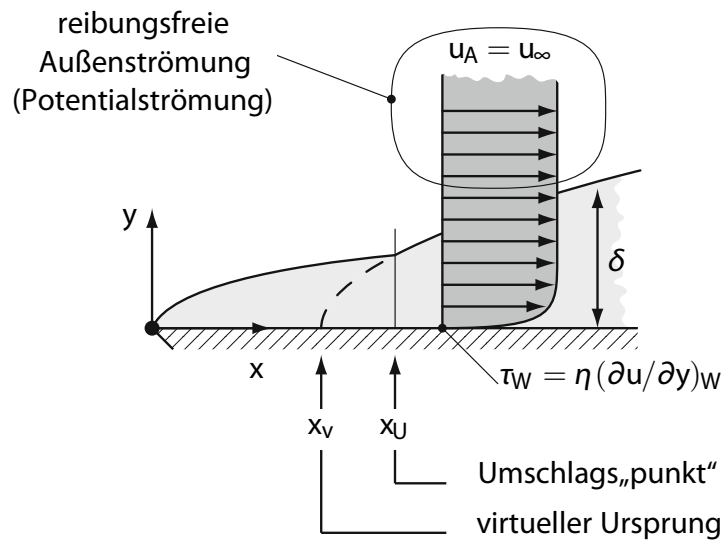
Im Allgemeinen ist die in den Wellen enthaltene Energie im Quadrat von der Wellenhöhe abhängig [7]. Diese muss dementsprechend verringert werden. Um das zu schaffen, muss man das Schiff entweder anders trimmen oder die Form des Schiffes optimieren. Da viele Schiffe bereits gebaut sind, ist eine Formoptimierung nur bedingt möglich. Deshalb stellt das Trimmen des Schiffes eine geeignete Möglichkeit zur Verringerung des Wellenwiderstandes dar.

### 2.2.2 Reibungswiderstand

Bei der Betrachtung des Reibungswiderstandes ist die Annahme einer reibungsfreien, wirbelfreien und inkompressiblen Strömung nicht mehr hinreichend. Es handelt sich vielmehr um eine Strömung mit einem viskosen, also reibungsbehafteten, Fluid. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache muss die Haftbedingung aus Gleichung (2.22) am Schiff erfüllt sein, wobei  $y$  den Wandabstand beschreibt. Im

Außenbereich gilt nach wie vor die Potentialströmung, wobei die Grenzschicht gesondert betrachtet werden muss [7].

$$u(y=0) = 0 \quad (2.22)$$



**Abbildung 2.7:** Turbulente Grenzschicht an einer ebenen Wand [9]

Schiffbauliche Strömungsprobleme fallen mit großer Wahrscheinlichkeit in den turbulenten Bereich. In Abbildung 2.7 ist zu erkennen, dass zunächst eine laminare Grenzschicht vorliegt. Im Umschlagspunkt erfolgt der Übergang von einer laminaren in eine turbulente Grenzschicht. Zur Erläuterung wird zunächst die Reynolds-Zahl  $Re$  eingeführt.

Die  $Re$ -Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl und stellt das Verhältnis von der Trägheitskraft zur Reibungskraft dar (siehe Gleichung (2.23)). Bezüglich der Lauflänge  $x$  liegt der Umschlagspunkt im Bereich von  $3.5 \cdot 10^5 Re$  bis  $10^6 Re$ . Für Containerschiffe oder Bulker liegt die  $Re$ -Zahl auch bei niedrigen Geschwindigkeiten meist höher als  $10^7$ . Zudem kann der laminare Bereich meist vernachlässigt werden, da er im Allgemeinen sehr klein ausfällt.

$$Re = \frac{ux}{\nu} \quad (2.23)$$

$$Re_{krit} = 3.5 \cdot 10^5 - 10^6 \quad (2.24)$$

Angesichts der Tatsache, dass die Haftbedingung aus Gleichung (2.22) am Schiffsrumpf gelten muss und dass außerhalb der Grenzschicht die Potentialströmung

gilt, kommt es zu dem Geschwindigkeitsgradienten  $\partial u/\partial y$ . Die Geschwindigkeit nimmt folglich vom Schiffsrumpf in  $y$ -Richtung zum Außenbereich zu. Dies verdeutlicht das Geschwindigkeitsfeld aus Abbildung 2.7. Die dynamische Viskosität  $\eta$ , welche das Maß für die Zähigkeit eines Fluides darstellt, multipliziert mit dem Geschwindigkeitsgradienten liefert die Wandschubspannung  $\tau_w$ .

$$\tau_w = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.25)$$

Um den Reibungswiderstand des Schiffes zu erhalten, wird die Schubspannung über den gesamten Schiffsrumpf integriert.

Eine ausführliche Behandlung der Grenzschicht ist in [8] und [9] zu finden.

### 2.2.3 Froudesche Zahl

Die Froudesche Zahl (nach William Froude 1810–1879), im folgendem  $Fr$  genannt, ist eine dimensionslose Kennzahl und charakterisiert Strömungen mit freier Oberfläche in beispielsweise tiefem Wasser, Flußströmungen, Schiffsumströmungen und Wellen.

Sie stellt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Schwerkraften dar und ist über Gleichung (2.26) definiert.

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL_{pp}}} \quad (2.26)$$

Genauer über die Froudesche Zahl kann unter anderem in [1] und [3] nachgelesen werden.

## 2.3 Numerische Strömungsmechanik

Eine ausführliche Herleitung der hier behandelten Themen kann den Quellen [1], [5] und [10] entnommen werden.

### 2.3.1 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass die Masse nicht verloren gehen kann. Die wird oft auch Erhaltung der Masse benannt. Die zeitliche Änderung der Masse ist die Differenz der einströmenden zu den ausströmenden Massenströmen. Für die Kontinuitätsgleichung ergibt sich die Gleichung (2.27).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.27)$$

Bei der Betrachtung eines inkompressiblen Fluids ist die Dichte konstant. Somit folgt für diesen Fall die Gleichung (2.28).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.28)$$

### 2.3.2 RANSE

Die **Reynolds Averaged Navier Stokes Equation** (*RANSE*, dt. Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen) ist eine spezielle Form der Navier-Stokes-Gleichung. Die Navier-Stokes-Gleichung ist eine Erhaltungsgleichung des Impulses und wird im Folgenden eingeführt. Die zeitliche Änderung des Impulses setzt sich aus der Differenz der eintretenden und der austretenden Impulsströmen zusammen und wird zusätzlich dazu durch angreifende Kräfte am Volumenelement beeinflusst. In Gleichung (2.29) ist der inkompressible Fall (mit konstantem  $\rho$  und  $\eta$ ) der Navier-Stokes-Gleichung in  $x$ -Richtung dargestellt.

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) = k_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.29)$$

Die meisten strömungstechnischen Probleme laufen mit turbulenten Strömungen ab. Turbulente Strömungen sind dabei instationär und nur mit enormem Rechenaufwand annähernd zu bestimmen. Für ingenieurtechnische Berechnungen im Schiffbau gelten die *RANS*-Gleichungen als ausreichend genau. Die Idee dabei ist, die einzelnen Schwankungsgrößen einer statistisch stationären Strömung zeitlich zu mitteln. Dies erfolgt durch den Mittelungsansatz von Reynolds (1895). Die *RANS*-Gleichung in  $x$ -Richtung ist in Gleichung (2.30) beschrieben. Hierbei wirkt der hinzugekommene Term, welcher die einzelnen Schwankungen  $u'$ ,  $v'$  und  $w'$  beinhaltet, wie eine zusätzliche Spannung und wird als Reynolds-Spannung bezeichnet.

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = k_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \eta (\nabla^2 \bar{u}) - \underbrace{\rho \left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right)}_{\text{Reynolds-Spannung}} \quad (2.30)$$

Durch diese Methode kommen zu den unbekanntenen Größen  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$  und  $\bar{p}$  noch zusätzlich 6 weitere Unbekannte dazu - die Reynolds-Spannungen. Die zur Verfügung stehenden



Erhaltungsgleichungen sind jedoch nur die *RANS*-Gleichung in alle drei Richtungen und die Kontinuitätsgleichung. Zur Lösung dieses Problems werden halbempirische Turbulenzmodelle eingesetzt. Eine genaue Beschreibung dieser Modelle ist in den zu Beginn dieses Kapitels eingeführten Quellen zu finden.

### 2.3.3 Mehrphasenströmung

Bei der Leistungsprognose von Schiffen handelt es sich um eine Simulation mit zwei nicht mischbaren Fluiden - Wasser und Luft. Um die beiden Fluide getrennt voneinander abbilden zu können, wird sich der *VoF*-Methode (**V**olume **o**f **F**luid) bedient. Eine spezielle Aufmerksamkeit liegt dabei auf der Kontaktfläche, auch freie Oberfläche genannt. Bei der *VoF*-Methode wird eine zusätzliche Erhaltungsgleichung gelöst (siehe Gleichung (2.31)), die den Zellfüllgrad  $\alpha$  berücksichtigt. Ist  $\alpha = 1$  befindet sich 100% Wasser in der Zelle, bei  $\alpha = 0$  demnach 100% Luft.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha \vec{u})}{\partial x} + \frac{\partial (\alpha \vec{v})}{\partial y} + \frac{\partial (\alpha \vec{w})}{\partial z} = 0 \quad (2.31)$$

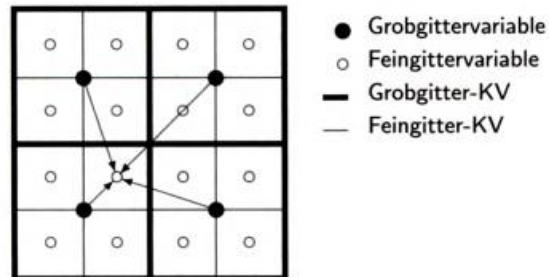
### 2.3.4 Zusätzlicher Quellterm mittels Volumenkraft

Gelegentlich ist es sinnvoll, künstliche Volumenkräfte wirken zu lassen. Bei der Leistungsprognose von Schiffen können durch das Starten der Berechnung unphysikalische Störwellen entstehen. Diese werden teilweise an den Rändern des Berechnungsgebietes reflektiert und laufen infolgedessen in Richtung des Schiffsrumpfes. Dieser Effekt manipuliert die Widerstandskraft und die Schiffsbewegungen. Aus diesem Grund wird ein zusätzlicher Quellterm integriert, welcher im Fernfeld des Schiffes die Wellen mit Hilfe von Volumenkräften dämpfen soll. Eine genaue Umsetzung dieser Volumenkraft erfolgt in Abschnitt 4.1.

### 2.3.5 Abbilden von Lösungen

Abbilden von Lösungen bedeutet Lösungen eines Gitters auf ein anderes Gitter zu übertragen. Dabei wird hier die Übertragung einer Lösung auf ein feineres Gitter betrachtet. Die Übertragung von Lösungen auf ein gröberes Gitter findet auch ihre Anwendung, wird in dieser Bachelorthesis jedoch nicht benötigt. Um die beim Übertragen von Lösungen angewendete Mathematik zu erklären, wird ein 2D-Fall betrachtet, bei dem das feinere Netz eine vierfach höhere Netzfeinheit besitzt. Man betrachte dazu Abbildung 2.8. Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass sich jedes Grobgitter-Kontrollvolumen geviertelt hat. Die Feingittervariable, auf die die Pfeile von den Grobgittervariablen zeigen, muss nun über eine

Interpolation ermittelt werden. Dabei muss die Interpolation mit der Ordnung des gewählten Diskretisierungsverfahrens konsistent sein. Die bilineare Interpolation kann beispielsweise bei einer Diskretisierung 2. Ordnung verwendet werden [5]. In Abschnitt 2.4.4 ist die bilineare Interpolation anhand eines Beispiels erklärt.



**Abbildung 2.8:** Variablentransfer vom groben auf das feinere Gitter (Interpolation) [5]

## 2.4 Mathematische Grundlagen

Die im Folgedem aufgeführten mathematischen Grundlagen sind unter anderem in [4] beschrieben.

### 2.4.1 Mittelwert

Für eine statistische Untersuchung von Simulationsergebnissen ist es hilfreich, sich der Grundlagen der Statistik zu bedienen. Zunächst muss dabei das arithmetische Mittel (bzw. der Mittelwert einer Streuung) eingeführt werden.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.32)$$

### 2.4.2 Standardabweichung

Die Standardabweichung  $\sigma$  erhält man aus der Quadratwurzel der Varianz  $VAR$  aus Gleichung (2.33). Dabei ist die Varianz ein geeignetes Maß für die Streuung der Einzelwerte  $x_i$ .

$$VAR = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.33)$$

$$\sigma = \sqrt{VAR} \quad (2.34)$$

### 2.4.3 Lineare Regressionsanalyse

Weiterhin ist die lineare Regressionsanalyse ein weiterer guter Ansatz, um einen Anhaltswert für die Streuung von Einzelwerten zu erhalten. Tendiert die Steigung gegen 0, kann davon ausgegangen werden, dass die Schwankung konstant um einen Wert, bestenfalls den Mittelwert, erfolgt. Bei größeren positiven oder negativen Steigungen tendieren die Werte hingegen noch nicht gegen einen Endwert. Die dabei entstehende lineare Funktion passt sich ideal den Messpunkten  $P_i = (x_i, y_i)$  an.

Eine allgemeine lineare Funktion ist über

$$f(x) = mx + b \quad (2.35)$$

definiert. Die dafür benötigte Steigung  $m$  kann über Gleichung (2.37) ermittelt werden. Der Ordinatenabschnitt  $b$  ist über Gleichung (2.38) definiert.

$$\Delta = n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (2.36)$$

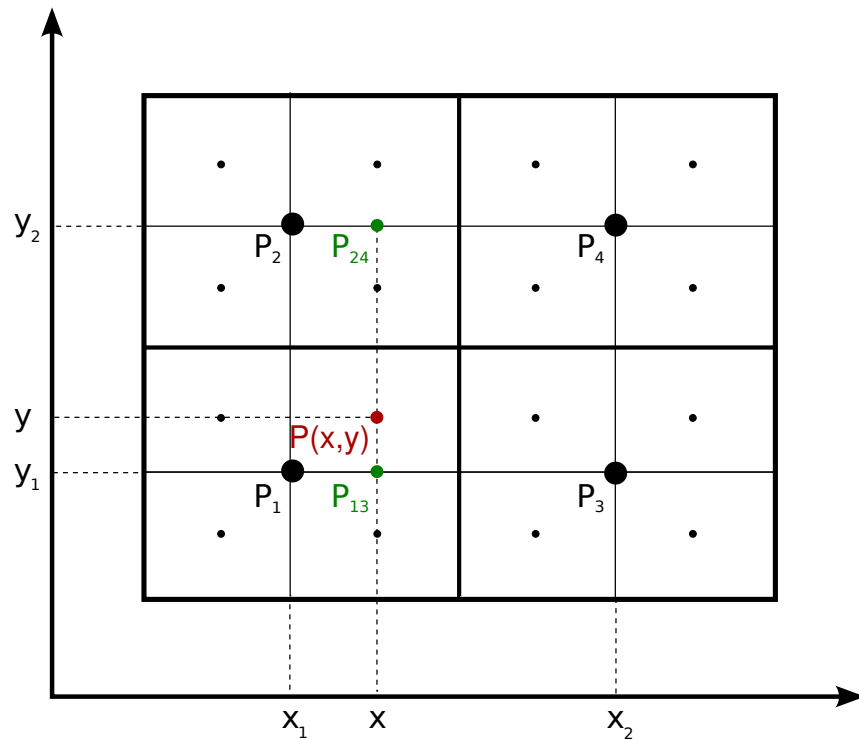
$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\Delta} \quad (2.37)$$

$$b = \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i \right)}{\Delta} \quad (2.38)$$

### 2.4.4 Bilineare Interpolation

Die bilineare Interpolation ist eine Erweiterung der linearen Interpolation um eine weitere Dimension. Dabei ist der Wert eines gesuchten Punktes  $P(x,y)$  über mehrere eindimensionale lineare Interpolationen zu bestimmen. Eine einfache lineare Interpolation ist in Gleichung (2.39) gegeben.

$$P = P_1 + \frac{P_2 - P_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (2.39)$$



**Abbildung 2.9:** Variablenübertragung durch Interpolation, detailliert

Zu Bestimmung des in Abbildung 2.9 rot markierten Punktes  $P(x,y)$ , wird zunächst eine lineare Interpolation in  $x$ -Richtung zwischen den zwei Punkten  $P_1$  und  $P_3$  bzw.  $P_2$  und  $P_4$  durchgeführt, um auf die Werte von den grün markierten Punkten  $P_{13}$  bzw.  $P_{24}$  zu kommen. Ist dies erfolgt, kann über eine lineare Interpolation in  $y$ -Richtung der gesuchte Punkt berechnet werden.

$$P_{13} = P_1 + \frac{P_3 - P_1}{x_3 - x_1} (x - x_1)$$

$$P_{24} = P_2 + \frac{P_4 - P_2}{x_4 - x_2} (x - x_2)$$

$$P_{x,y} = P_{13} + \frac{P_{24} - P_{13}}{y_2 - y_1} (y - y_1)$$

## 3 Berechnungsgrundlagen

### 3.1 Schiffsdaten

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung dieser Bachelorthesis verlangt eine Vielzahl von *RANSE*-Simulationen an Schiffen. Diese werden mit Hilfe der Open-Source-Software *OpenFOAM* Version 1.6 berechnet. Für alle durchgeführten Simulationen ist das Schiff aus Abbildung 3.1 gewählt worden. Die Parameter dieses Schiffes sind der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Um die später ermittelten Ergebnisse vergleichen zu können, werden zum einen Lösungen im Modellmaßstab und im Originalmaßstab erzeugt. Zum anderen sind zwei Anströmgeschwindigkeiten gewählt. Damit soll gewährleistet werden, dass die Ergebnisse für das Abbilden von Lösungen, die Wellendämpfung und die Dämpfung des Schiffes geschwindigkeitsunabhängig sind.

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Länge zwischen den Loten	$L_{pp}$	330	$m$
Breite	$B_S$	46.1	$m$
Tiefgang	$T_S$	13.6	$m$
Masse	$m_S$	$124.0202 \cdot 10^6$	$kg$
Wassertiefe	$D_S$	$1 \cdot L_{pp}$	$m$
Skalenfaktor	$\lambda$	40	—

**Tabelle 3.1:** Schiffsparameter



**Abbildung 3.1:** Verwendeter Schiffsrumpf

Die in der Berechnung verwendeten physikalischen Konstanten sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Dichte des Wassers	$\rho_W$	1025	$kg/m^3$
Dichte der Luft	$\rho_L$	1	$kg/m^3$
Kinematische Viskosität des Wassers	$\nu_W$	$1 \cdot 10^{-6}$	$m^2/s$
Kinematische Viskosität der Luft	$\nu_L$	$1.48 \cdot 10^{-5}$	$m^2/s$
Erdbeschleunigung	$g$	9.81	$m/s^2$

**Tabelle 3.2:** Physikalische Konstanten

## 3.2 Netzgenerierung

Die Netzgenerierung erfolgt mit Hilfe eines von *FutureShip* entwickelten Programmes, welches mit den *OpenFOAM*-Werkzeugen *blockMesh*, *snappyHexMesh* und *refineMesh* arbeitet. Dabei wird aus einem quaderförmigen Berechnungsgebiet die verwendete Schiffsgeometrie, welche als *STL* (Standard Triangulation Language) vorliegt, ausgeschnitten. Darüber hinaus wird in der Nähe des Schiffsrumpfes und die Wasserlinie um einen gewünschten Grad verfeinert.

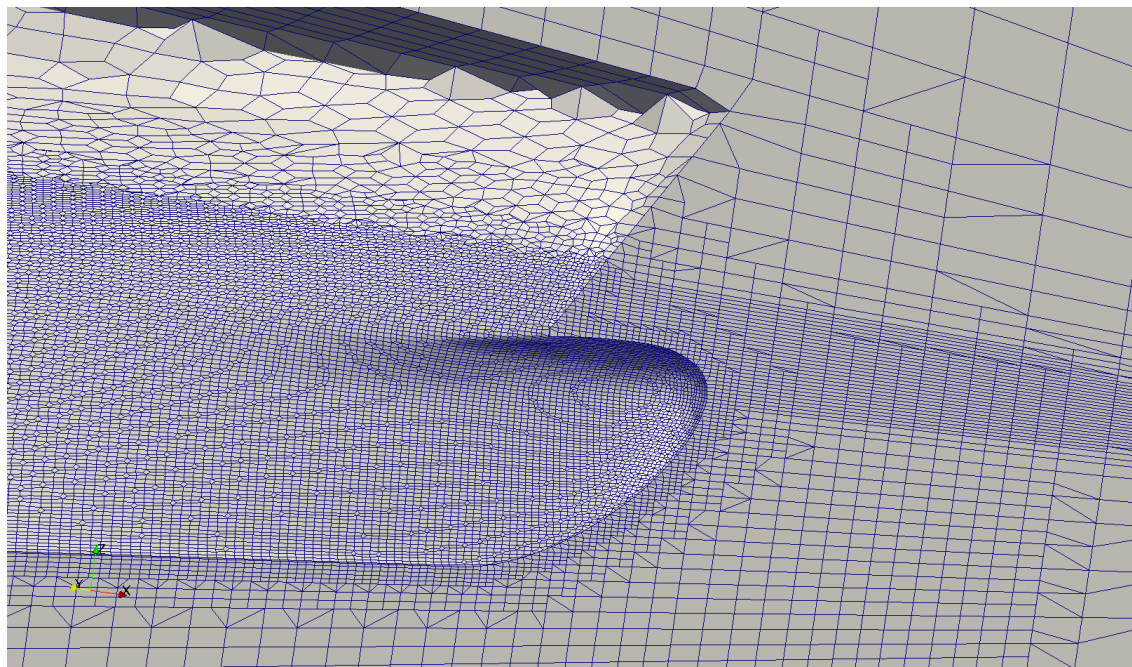
Der Koordinatenursprung ist hierbei der von der Konstruktion genutzte Ursprung (siehe Abschnitt 2.1). Von diesem Punkt ausgehend, ist die Größe des Berechnungsgebietes in Tabelle 3.3 dargestellt. Diese Einstellungen beruhen auf Erfahrungen und werden nicht weiter hinterfragt. Gerechnet wird mit einem Symmetrie-Modell, aus diesem Grund wird die negative *y*-Richtung nicht berücksichtigt.

Richtung	Wert
pos. <i>x</i> -Richtung	$2 \cdot L_{pp}$
neg. <i>x</i> -Richtung	$2 \cdot L_{pp}$
pos. <i>y</i> -Richtung	$1 \cdot L_{pp}$
pos. <i>z</i> -Richtung	$1/3 \cdot L_{pp}$
neg. <i>z</i> -Richtung	$1 \cdot L_{pp}$

**Tabelle 3.3:** *BlockMesh*-Dimensionierung

Um zuverlässige Lösungen zu erhalten, ist es sinnvoll, in einigen bestimmten Bereichen zu verfeinern. Der Bereich der freien Oberfläche muss verfeinert werden, damit die schiffseigenen Wellen und der Phasenübergang dargestellt werden können. Da bei der Leistungsprognose von Schiffen die Schiffswiderstände im Wasser eine Rolle spielen, sollte der komplette eingetauchte Rumpf verfeinert werden. Diese Verfeinerung ist in Abbildung 3.2 anhand des Bugs verdeutlicht. Außerdem wird unterhalb des Schiffes ein quaderförmiger Bereich verfeinert, um die Effekte, die durch die Wellen

entstehen (z.B. die Orbitalwellengeschwindigkeit), abbilden zu können. Die Verfeinerung der freien Oberfläche nimmt in Schiffsrichtung keilförmig zu. Dies dient dazu, das Schiffswellensystem (vgl. Abbildung 2.6) abbilden zu können. Daher muss gewährleistet sein, dass die freie Oberfläche nach erfolgter Bewegung und der damit einhergehenden Gitterverformung weiterhin im verfeinerten Bereich liegt.



**Abbildung 3.2:** Detailansicht der Verfeinerung am Bug

Damit der reibungsbehaftete Anteil des Glattwasserwiderstandes in ausreichender Genauigkeit berücksichtigt werden kann, werden an der Grenzschicht, also unmittelbar am Schiffsrumpf, Schichten (engl.: *layer*) aus quader- bzw. prismaförmigen Zellen eingefügt. Auch hierfür bietet das *snappyHexMesh*-Werkzeug eine Option. Mit der *Layer*-Option lässt sich die Zellenstärke der prismaförmigen Schicht definieren. Diese muss bei Berechnungen im Originalmaßstab im Bereich von 10 Zellen liegen. Beim Modellmaßstab reicht meist schon 1 Zelle als *Layer*-Schicht.

Allgemein ist anzumerken, dass die hier verwendeten Berechnungsgitter noch nicht die absolute Feinheit besitzen, um eine komplette Leistungsprognose des zu untersuchenden Schiffes durchzuführen. Um zuverlässige Werte für die Widerstandskräfte zu erhalten, müssten die Berechnungsgitter weiter verfeinert werden. Für die in der Aufgabenstellung geforderten Untersuchung sind die Berechnungsgitter jedoch vollkommen ausreichend fein gewählt.

Für eine Simulation, bei der sich das Schiff in tiefem Wasser befindet, gilt, dass die Wassertiefe im Berechnungsgebiet mindestens gleich der Schiffslänge gewählt werden muss. Je kleiner der Bereich unter dem Schiff ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Unterdruck entsteht, wodurch das Schiff tiefer taucht. Dabei ist die Geschwindigkeit des Schiffes ein ausschlaggebender Faktor. Fährt das Schiff

mit einer zu hohen Geschwindigkeit, kommt es in flachem Wasser zu recht deutlichen Tiefertauchungen. Dieser Vorgang wird *Squat* genannt und kommt häufig in Kanälen vor.

### 3.3 Variationen der Anströmgeschwindigkeiten

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt, wird bei den durchgeführten Simulationen die Geschwindigkeit variiert. Zur Realisierung eines interessanten Strömungsgebietes, bei dem sich hohe Wellen am Rumpf des Schiffes bilden, gilt die  $Fr = 0.225$  als gute Näherung. Durch umstellen von Gleichung (2.26) ergibt sich für die Geschwindigkeit die Gleichung (3.1). Unter Berücksichtigung des Modellmaßstabes  $\lambda$  gilt Gleichung (3.2). Die Strömung im Berechnungsgebiet erfolgt in negative x-Richtung und wird aus diesem Grund in *OpenFOAM* negativ gesetzt.

$$u = Fr \cdot \sqrt{gL_{pp}} \quad (3.1)$$

$$u = Fr \cdot \sqrt{\frac{gL_{pp}}{\lambda}} \quad (3.2)$$

Außerdem wird noch zwischen Modellmaßstab und Originalmaßstab unterschieden. Darüber hinaus ist die Geschwindigkeit zur Anschauung in Knoten (*kn*) umgewandelt, da diese Einheit in der Seefahrt ihre Anwendung findet. Die Umwandlung erfolgt mit Hilfe der Gleichung (3.3).

$$1 \text{ kn} = \frac{1852 \text{ m}}{3600 \text{ s}} \quad (3.3)$$

#### 3.3.1 Originalmaßstab

Durch Einsetzen der Schiffsgrößen in Gleichung (3.1) erhält man  $u_1$ . Als zweite Geschwindigkeit  $u_2$  wird die Hälfte von  $u_1$  gewählt.

$$\begin{aligned} u_1 &= 0.225 \cdot \sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 330 \text{ m}} \\ &= \underline{\underline{12.8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \hat{=} 24.9 \text{ kn}}} \\ u_2 &= 0.225 \cdot \sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 330 \text{ m}} \cdot \frac{1}{2} \\ &= \underline{\underline{6.4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \hat{=} 12.45 \text{ kn}}} \end{aligned}$$



Die beiden errechneten Geschwindigkeiten mit  $u_1 = 24.90 \text{ kn}$  und  $u_2 = 12.45 \text{ kn}$  liegen im Bereich der typischen Geschwindigkeiten eines Containerschiffes.

### 3.3.2 Modellmaßstab

Unter Berücksichtigung des Modellmaßstabes durch Gleichung (3.2) verändern sich  $u_1$  und  $u_2$  wie folgt:

$$\begin{aligned} u_1 &= 0.225 \cdot \sqrt{\frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 330 \text{ m}}{40}} \\ &= \underline{\underline{2.02 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} \\ u_2 &= 0.225 \cdot \sqrt{\frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 330 \text{ m}}{40}} \cdot \frac{1}{2} \\ &= \underline{\underline{1.01 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} \end{aligned}$$

### 3.3.3 Turbulente Grenzschicht

Mit den zuvor berechneten Geschwindigkeiten soll die Annahme aus Abschnitt 2.2.2 belegt werden, dass die Strömung stets als turbulent betrachtet werden kann. Hierfür wird der Umschlagspunkt, also die kritische Länge  $L_{krit}$  berechnet. Sie ist über die kritische Reynolds-Zahl zu ermitteln, wobei hierfür eine kritische Reynolds-Zahl von  $3.5 \cdot 10^5$  angenommen wird. Somit folgt aus Gleichung (2.23):

$$\begin{aligned} L_{krit} &= \frac{Re \nu}{u} \\ &= \frac{3.5 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{6.4 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \\ &= \underline{\underline{0.055 \text{ m}}} \end{aligned}$$

Bezogen auf die Schiffslänge  $L_{pp}$  von  $330 \text{ m}$  ist die laminare Grenzschicht mit der Länge  $0.055 \text{ m}$  zu vernachlässigen. Im Modellversuch wird durch künstliche Turbulenzerzeugung eine turbulente Strömung sichergestellt, somit trifft die Annahme auch hier zu.

## 3.4 Parametereinstellungen

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den in *OpenFOAM* vorgenommenen Randbedingungen und dem Lösungsverfahren. An diesen Einstellungen werden keine Veränderungen vorgenommen, da dies in der Bachelorthesis nicht vorgesehen ist. Des Weiteren handelt es sich um eine inkompressible Berechnung. Aus diesem Grund wird die Energieerhaltungsgleichung nicht gelöst und die in Tabelle 3.2 aufgelisteten physikalischen Werte sind im Laufe der Simulation als konstant zu betrachten. Folglich wird auch die Luft als inkompressibel angenommen.

### 3.4.1 *sixDof*-Lösungsverfahren

Das für die Leistungsprognose von Schiffen verwendete Lösungsverfahren ist von *FutureShip* intern entworfen worden. Es besteht aus dem von *OpenFOAM* zur Verfügung gestellten Lösungsverfahren mit dem Namen *interDyMFoam*. Dieses basiert auf dem *interFoam*-Lösungsverfahren, welches für Mehrphasenströmungen geeignet ist. Allerdings beinhaltet es noch eine zusätzliche dynamische Gitterverformung (engl.: dynamic mesh). Um die Bewegungen des Schiffes simulieren zu können, ist eine Bewegungsgleichung für den Schiffskörper implementiert, wobei zunächst alle sechs Freiheitsgrade (engl.: six degrees of freedom, sixDoF) zur Verfügung stehen. Bei der Berechnung des Glattwasserwiderstandes sind allerdings alle Freiheitsgrade, bis auf die Bewegung in  $z$ -Richtung und die Rotation um die  $y$ -Achse, gesperrt. Diese Bewegungen können zusätzlich noch gedämpft werden. Näheres dazu ist in Abschnitt 4.2 nachzulesen. Die Gitterverformung darf dabei nur in einem bestimmten Bereich stattfinden. Man betrachte dazu Abbildung A.1. Im roten Bereich findet keine Verformung statt.

### 3.4.2 Randbedingungen

In Abbildung A.2 ist das Berechnungsgebiet mit den Rändern zu erkennen. Dabei ist  $x_{max}$  als Einlass und  $x_{min}$  als Auslass definiert. Um die Fahrt des Schiffes in positive  $x$ -Richtung zu simulieren sind die gewählten Anströmgeschwindigkeiten in *OpenFOAM* negativ anzusetzen. Der im Vordergrund nicht eingeblendete Rand  $y_{min}$  ist die Symmetrieebene. Darin befindet sich der halbierte Schiffsrumpf *hull* mit einer Wand-Randbedingung. Die übrigen Ränder  $y_{max}$ ,  $z_{min}$  und  $z_{max}$  sind *äußere Ränder*.

---

## 4 Simulation

### 4.1 Dämpfung der Störwellen im Berechnungsgebiet

#### 4.1.1 Motivation - IST-Zustand

Das Anschalten von *RANSE*-Simulationen zur Leistungsprognose von Schiffen erfolgt mit einer vordefinierten Strömung, welche augenblicklich in der vorgegebenen Geschwindigkeit über den Einlass in das Berechnungsgebiet einströmt. Dieser Anschaltvorgang verursacht unphysikalische Störwellen. Diese werden teilweise an den Rändern des Berechnungsgebietes reflektiert und laufen zurück in Richtung des Schiffsrumpfes. Infolgedessen kommt es stellenweise zu oszillierenden Widerstandskräften und Schiffsbewegungen. Störwellen sollten deshalb möglichst vermieden oder aber gedämpft werden. Eine Möglichkeit stellt die Anwendung von Volumenkräften dar. Diese werden im Fernfeld des Schiffes angesetzt, um die Wellenbewegungen zu dämpfen und die Störwellen zu eliminieren. Die Wellen am Schiffsrumpf dürfen dabei nicht beeinflusst werden, damit der Glattwasserwiderstand nicht verfälscht wird.

Es werden Berechnungen mit verschiedenen Einstellungen bezüglich der im Fernfeld wirkenden Volumenkräfte erfolgen. Diese werden bewertet und eine möglichst allgemeine Lösung soll gefunden werden.

#### 4.1.2 Vorgehensweise

Ein Makro, welches Störwellen im Berechnungsgebiet dämpft, ist von der Firma *FutureShip* bereits in *OpenFOAM* implementiert worden. Die Dämpfung erfolgt dabei mit Hilfe einer gegen die Wellenbewegung gerichteten Volumenkraft (engl.: body force). Die dafür benötigte, am Volumenelement angreifende, Volumenkraft wird über die Gleichung (4.1) ermittelt.

$$\frac{\vec{BF}}{\partial u \partial v \partial w} = \frac{-(\vec{u} - \vec{u}_0)}{\Delta t} \rho \alpha \gamma \quad (4.1)$$

Es wird die Differenz von der tatsächlich im Volumenelement vorherrschenden Geschwindigkeit  $\vec{u}$  zur Einlassgeschwindigkeit  $\vec{u}_0$  gebildet. Diese wird durch den aktuellen Zeitschritt  $\Delta t$  geteilt, wodurch man eine momentane Beschleunigung erhält. Multipliziert mit der Mischdichte  $\rho$  resultiert eine Volumenkraft. Diese soll jedoch nicht in der Luft wirken. Somit wird die Gleichung zusätzlich mit  $\alpha$  multipliziert. Mittels  $\gamma$  kann zusätzlich die Intensität der Dämpfung gesteuert werden.

Um die Wirkungsweise der Wellendämpfung zu beeinflussen, ergeben sich zwei Stellschrauben. Eine dieser Stellschrauben steckt direkt in der eben aufgeführten Gleichung, die Dämpfungsintensität  $\gamma$ . Als Einstellmöglichkeit dient eine beliebige Zahl, wobei  $\gamma = 1$  einer 100% entgegen der Wellenbewegung wirkenden Kraft entspricht. Würde man  $\gamma$  größer wählen, könnten neue Wellen entstehen. Das System könnte sich zusätzlich dazu aufschwingen und die Berechnung wäre vollständig verfälscht. Somit werden Berechnungen mit einer Intensität zwischen 0 und 1 durchgeführt.

Als zweite Stellschraube ist die Entfernung zum Schiff zu definieren, ab der die Wellendämpfung einsetzen soll. Dabei müssen zwei Faktoren angegeben werden,  $x_1$  und  $x_2$ . Diese Faktoren werden mit  $L_{pp}$  multipliziert, wobei die Dämpfung bei  $x_1 \cdot L_{pp}$  startet und die Intensität bis zu  $x_2 \cdot L_{pp}$  mit einer linearen Funktion auf ihre gewünschte Stärke hochgefahren wird. Dies dient einerseits dazu, dass die Dämpfung nicht abrupt einsetzt, um neue Störungen zu verhindern. Andererseits sollte ein gewisser Abstand zum Schiffsrumpf gewährleistet sein, um das Wellenbild am Rumpf nicht zu verfälschen.

Nummer	$\gamma$	$x_1$	$x_2$
1	0.0	0.0	0.0
2	0.25	0.4	1.6
3	0.25	0.6	1.4
4	0.25	0.8	2.0
5	0.5	0.4	1.6
6	0.5	0.6	1.2
7	0.5	0.8	2.0
8	0.5	1.2	2.0
9	0.75	0.8	2.0
10	1.0	0.8	2.0

**Tabelle 4.1:** Parametereinstellung für die Untersuchung der Wellendämpfung

Das für die Untersuchung gewählte Berechnungsgitter besitzt eine Zellenanzahl von rund 200 000 Zellen, wobei keine *Layer*-Schicht hinzugefügt wurde. Für *CFD*-Berechnungen im Schiffbau gilt dieses Gitter als sehr grob. Da die

Leistungsprognose von Schiffen jedoch mit Hilfe von mehreren Berechnungsgittern erfolgt und die Berechnungen in der Regel auf einem sehr groben Gitter gestartet werden, ist eine Analyse auf diesem Berechnungsgitter sinnvoll. Zudem benötigt das Eliminieren von Störwellen mehr Zeit, je feiner das Berechnungsgitter gewählt wird. Können die größten Störungen allerdings schon mit Hilfe eines groben Berechnungsgitters eliminiert werden, so können die feineren Berechnungsgitter deutlich schneller konvergieren. Für die Auswertung der Wellendämpfung werden 10 Berechnungen gestartet. Dabei werden die gewählten Variationen in den eingeführten Stellschrauben in Tabelle 4.1 aufgezeigt.

## 4.2 Dämpfung der Schiffsbewegungen

### 4.2.1 Motivation - IST-Zustand

Resultierend aus dem unphysikalischen Anschaltvorgang, wobei abrupt eine Geschwindigkeit einströmt, und den dadurch hervorgerufenen Störwellen, verändert sich die Umgebung des Schiffes. Die Schwimmelage des Schiffes passt sich infolgedessen dynamisch an die veränderten Bedingungen an. Es kommt zu Tauch- und Stampfbewegungen. Durch die abrupte Änderung der äußeren Bedingungen wird das Schiff und das umgebende Wasser plötzlich beschleunigt. Dabei können sich relativ große Geschwindigkeiten in den Tauch- Stampfbewegungen ergeben, die dazu führen, dass das Schiff über die endgültige Schwimmelage hinaus schwingt und diese nur langsam in Form einer Schwingung erreicht. Um die endgültige Schwimmelage möglichst schnell zu erlangen, sollten die entstehenden Bewegungen gedämpft ablaufen. Ein für diese Dämpfung entwickeltes Makro soll untersucht und überprüft werden.

Bei der Untersuchung des Makros sollen möglichst ideale, von äußeren Bedingungen unabhängige Einstellungen gefunden werden. Hierfür werden einige Berechnungen gestartet und das Verhalten der Schiffsbewegungen untersucht.

### 4.2.2 Vorgehensweise

Ein Makro, welches die Schiffsbewegungen gedämpft ablaufen lässt, ist von der Firma *FutureShip* bereits in *OpenFOAM* implementiert worden. Das Makro bedient sich dabei nicht der Bewegungsgleichung aus Abschnitt 2.1. Stattdessen wird die Massenträgheit des Schiffes vernachlässigt, um Schwingungen zu vermeiden. Die im Makro für die gedämpften Tauch- und Stampfbewegungen benutzten Bewegungsgleichungen werden im Folgenden erläutert. Die dafür benötigten Werte der Schiffsmasse  $m_S$ , der Federkonstante  $c$  und der Stampfkonstante  $c_\psi$  (vgl. Abschnitt 2.1) werden vor der Berechnung mit Hilfe eines firmeninternen Programmes ermittelt und sind für die Berechnungen als gegeben vorausgesetzt.

Infolge des Anschaltvorganges wird das Schiff aus dem Gleichgewicht gebracht. Dadurch verändern sich die auf das Schiff wirkenden Kraft  $F_{Fluid}$ , dabei handelt es sich um die Summe der hydrostatischen und dynamischen Kräfte. Es ergibt sich eine Differenz zur Schwerkraft (Gleichung (4.2)). Damit sich das Gleichgewicht wieder einstellen kann, muss sich das Schiff mit  $\Delta z$  bewegen. Diese Bewegung kann über Gleichung (4.3) bestimmt werden. Um die Auslenkung des Schiffes vom ursprünglichen Nullpunkt gedämpft ablaufen zu lassen, soll nun für jeden Zeitschritt die Bewegungsgleichung aus Gleichung (4.4) gelöst werden. Die Auslenkung  $z_{t+1}$  für den aktuellen Zeitschritt besteht zum einen aus der Auslenkung  $z_t$  des vorherigen Zeitschrittes. Zum anderen wird zunächst die Differenzkraft  $\Delta F$  durch die Federkonstante  $c$  dividiert. Zusätzlich dazu, wird das dabei errechnete  $\Delta z$  mit dem Faktor  $\Delta t/\gamma_z$  multipliziert. Dabei steht  $\Delta t$  für die Größe des Zeitschritts,  $\gamma_z$  dient als Dämpfungszeit und wird vom Anwender festgelegt.

$$\Delta F = F_g - F_{Fluid} \quad (4.2)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta F}{c} \quad (4.3)$$

$$z_{t+1} = z_t + \frac{\Delta F}{c} \cdot \frac{\Delta t}{\gamma_z} \quad (4.4)$$

Durch die dynamische Veränderung der Auftriebskraft kommt es in der Regel zusätzlich zu einer Veränderung des Kraftangriffspunktes. Dieser liegt dabei meistens nicht auf der gleichen Wirkungslinie der Schwerkraft. Da das Schiff immer einen Gleichgewichtszustand anstrebt, muss es sich um die y-Achse drehen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Der Drehpunkt liegt dabei im Schwerpunkt. Der Hebelarm ergibt sich aus der Differenz der Vektoren des Schwerpunktes und des Angriffspunktes der Fluidkraft (Gleichung (4.5)). Der Stampfwinkel  $\Delta\psi$  und die Bewegungsgleichung für die Drehung  $\psi_{t+1}$  ergeben sich analog zur Dämpfung der Tiefertauchung.

$$M_{yy} = \begin{pmatrix} F_{Fluid} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot (x_{\vec{F}_g} - x_{\vec{F}_{Fluid}}) \quad (4.5)$$

$$\Delta\psi = \frac{M_{yy}}{c_\psi} \quad (4.6)$$

$$\psi_{t+1} = \psi_t + \frac{M_{yy}}{c_\psi} \cdot \frac{\Delta t}{\gamma_y} \quad (4.7)$$

Die Gleichungen 4.4 und 4.7 werden für jeden Zeitschritt  $\Delta t$  gelöst. Um geeignete Dämpfungszeiten zu finden, werden  $\gamma_z$  bzw.  $\gamma_{yy}$  variiert. Die dabei entstehenden Schiffsbewegungen sollen betrachtet werden. Ideal wäre, eine unabhängige Einstellung zu finden, bei der sich die endgültige Schwimmlage schnellstmöglich einstellt, damit die Rechenzeiten verkürzt werden können. Um die Dämpfungszeiten unabhängig von den äußeren Bedingungen zu setzen, ist es sinnvoll, eine Referenzzeit einzuführen. Die gewählte Referenzzeit ergibt sich aus dem Weg-Zeit-Gesetz  $s = v \cdot t$ . Hierbei wird als Strecke die Schiffslänge  $L_{pp}$  gewählt. Die Geschwindigkeit  $v_i$  ist die gewählte Strömungsgeschwindigkeit. Um die Dämpfungszeit nun zu variieren, wird die Referenzzeit mit einem Faktor  $n$  multipliziert. Somit berechnet sich die Dämpfungszeit über Gleichung (4.8). Im Originalmaßstab gilt dabei für die Geschwindigkeit  $u_1 = 24.90 \text{ kn}$  die Gleichung (4.9) und für die Geschwindigkeit  $u_2 = 12.45 \text{ kn}$  die Gleichung (4.10).

$$\gamma_{z,yy} = n_{z,yy} \cdot \frac{L_{pp}}{v_i} \quad (4.8)$$

$$\gamma_{u_1,(z,yy)} = n_{z,yy} \cdot 25.78s \quad (4.9)$$

$$\gamma_{u_2,(z,yy)} = n_{z,yy} \cdot 51.56s \quad (4.10)$$

Für den Modellmaßstab ergeben sich analog die Gleichung (4.12) und Gleichung (4.13), wobei zusätzlich der Skalenfaktor  $\lambda$  berücksichtigt werden muss.

$$\gamma_{z,yy} = n_{z,yy} \cdot \frac{L_{pp}}{\lambda \cdot v_i} \quad (4.11)$$

$$\gamma_{u_1,(z,yy)} = n_{z,yy} \cdot 4.08s \quad (4.12)$$

$$\gamma_{u_2,(z,yy)} = n_{z,yy} \cdot 8.16s \quad (4.13)$$

Zur Analyse des Verhaltens ist ein Berechnungsgitter mit einer Zellenanzahl von rund 1 100 000 Zellen gewählt, wobei Berechnungen durchgeführt werden, bei denen die Faktoren  $n_z$  und  $n_{yy}$  variiert werden. Tabelle 4.2 zeigt die gewählten Variationen.

Nummer	$n_z$	$n_{yy}$
1	0.5	1.0
2	0.5	2.0
3	1.0	1.0
4	1.0	2.0
5	2.0	1.0
6	2.0	2.0

**Tabelle 4.2:** Parametereinstellung für die Untersuchung der Schiffsdämpfung

## 4.3 Übertragen von Lösungen auf feinere Berechnungsgitter

### 4.3.1 Motivation - IST-Zustand

*RANSE*-Simulationen auf feinen Berechnungsgittern sind im Allgemeinen sehr rechenintensiv. Um dies zu verhindern, werden auf groben Berechnungsgittern erhaltene Lösungen auf feinere Berechnungsgitter übertragen. Dabei ist für die Leistungsprognose von Schiffen zunächst das Finden der Schwimmelage unter gegebenen Bedingungen von Interesse. Zu diesen zählen Tiefgang, Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeit. Diese Bedingungen werden variiert. Für jede dieser Variationen werden mehrere Berechnungen durchgeführt. Dabei wird zunächst auf einem groben Berechnungsgitter begonnen. Bei konstanter Schwimmelage wird die Lösung auf ein feineres Berechnungsgitter übertragen. Die Simulationszeiten pro Berechnungsgittertyp werden an Erfahrungswerten festgemacht. Ist die gewünschte Feinheit in der Schwimmelage erreicht, erfolgt eine Berechnung zur Analyse der optimalen Trimmung, bzw. des kleinsten Schiffswiderstandes.

Diese Berechnungsmethode soll nun hinterfragt werden. Dabei sind alte Rechnungen zu untersuchen und neue zu erstellen. Es wird verstärkt darauf geachtet, ob die ausgewählten Simulationszeiten sinnvoll sind und inwiefern man diese gegebenenfalls voraussagen kann. Des Weiteren soll anhand eines Beispiels analysiert werden, ob es überhaupt sinnvoll ist, die Lösungen auf ein feineres Berechnungsgitter zu übertragen, anstatt die Schwimmelage des Schiffes direkt mit der gewünschten Gitterfeinheit zu berechnen. Abschließend sind weitere Lösungsvorschläge zu diskutieren.

### 4.3.2 Vorgehensweise

Zu Beginn werden bereits berechnete Fälle analysiert und die Werte der Tauch- und Stampfbewegung betrachtet. Es wird darauf geachtet, ob die eingestellten Simulationszeiten sinnvoll gewählt wurden. Das richtet sich danach, ob die Werte



ein konstantes Level erreichen und nicht mehr zu stark oszillieren. Des Weiteren werden neue Berechnungen erstellt und untersucht. Hierfür werden vier verschiedene Berechnungsgitter erstellt, wobei die Verfeinerung an den in Abschnitt 3.2 erwähnten Stellen immer feiner gewählt wird. Das 4. Berechnungsgitter ist vom 3. nur in der Verfeinerung der Grenzschicht verschieden. Dies dient zur Auflösung der Reibungsverluste. Ein Beispiel dieser Schicht ist in Abbildung A.3 gezeigt. Zusätzlich wird im 4. Berechnungsgitter unterschieden in Modellmaßstab (engl.: model scale, *MS*) und Originalmaßstab (engl.: full scale, *FS*). Beim Modellmaßstab wird lediglich eine *Layer*-Schicht eingefügt, beim Originalmaßstab 10. Dies resultiert aus den unterschiedlichen *Re*-Zahlen. Um einen Überblick über die Verfeinerung zu bekommen, sind die Abbildungen A.4 bis A.6 zu betrachten. Tabelle 4.3 zeigt die Anzahl der Zellen der einzelnen Berechnungsgitter. Als Faustformel gilt, dass pro Prozessor nicht wesentlich mehr als 100 000 Zellen berechnet werden sollten. Ist das Berechnungsgitter größer, so wird die Berechnung parallelisiert. Die in der Tabelle mit *nProc* bezeichnete Spalte gibt an, wie viele Prozessoren für das entsprechende Berechnungsgitter gewählt wurden.

Berechnungsgitter	Zellen		<i>nProc</i>
1	228 282		2
2	504 761		5
3	1 128 267		11
4	<i>FS</i>	1 643 641	16
	<i>MS</i>	1 182 622	12

**Tabelle 4.3:** Zellenanzahl der Berechnungsgitter

Die Berechnung auf dem größten Berechnungsgitter wird gestartet. Nach einem vorgegebenen Zeitintervall werden in eine Datei unter anderem Werte für die Tiefertauchung, den Stampfwinkel, die gesamte Widerstandskraft, die Druckkraft und die reibungsbehaftete Widerstandskraft geschrieben. Die Schwimmlage des Schiffes auf dem aktuellen Berechnungsgitter ist gefunden, sobald die Werte für die Tiefertauchung und den Stampfwinkel einen konstanten Wert erreicht haben und die Schwankung um diesen Wert gering ist. Die Simulationszeit wird zunächst sehr hoch gewählt, da nicht direkt bekannt ist, wann die Berechnungen konstante Werte annehmen. Um die ausschlaggebenden Werte graphisch auszuwerten, kann das Programm *Gnuplot* benutzt werden. Dort lassen sich schnell die Daten einer Datei in einen Graphen plotten und analysieren. Zurzeit läuft eine Berechnung dann entweder die volle vorgegebene Simulationszeit oder kann vom Benutzer nach Analyse der Graphen beendet werden. Nach Beendigung der Berechnung kann diese auf ein feineres Berechnungsgitter übertragen werden. Zur Umsetzung der Übertragung bietet *OpenFOAM* ein eigenes Makro mit dem Namen *mapFields*. Dieses Makro beruht auf der in Abschnitt 2.4.4 eingeführten bilinearen Interpolation. Mit der Option *consistent* (dt.: gleichartig) kann zusätzlich angegeben werden, dass es sich um die gleiche Größe des Berechnungsgebietes

handelt, wobei lediglich einzelne Gebiete verfeinert worden sind.

Die eben beschriebene Berechnungsmethode, bei der die Lösungen auf ein feineres Berechnungsgitter übertragen werden, soll darüber hinaus hinterfragt werden. Dafür werden die Ergebnisse der folgenden Berechnungsmethoden verglichen:

- Kaskade
- einfache Übertragung
- ohne Übertragung

Hierbei beschreibt die *Kaskade* die oben aufgeführte Berechnungsmethode. Die *einfache Übertragung* ist eine Berechnung, die zunächst auf dem 3. Berechnungsgitter startet und die Lösung ausschließlich auf das 4. Berechnungsgitter, überträgt. Bei der Berechnung *ohne Übertragung* wird folglich direkt auf dem 4. Berechnungsgitter gerechnet.

### 4.3.3 Berechnungsüberwachung mit Abbruchkriterium

Bisher beruhen die Simulationszeiten auf Erfahrungswerten. Es besteht die Möglichkeit, dass diese Zeiten teilweise deutlich zu groß angesetzt ist. Einige Simulationen können schon lange vor Ende der Simulationszeit einen nahezu konstanten Wert erreicht haben. Aufgrund der Fülle an Berechnungsfällen ist die Überwachung jeder Berechnung mit Hilfe von *Gnuplot* nur bedingt möglich. Es muss also eine Möglichkeit geben, die Berechnungen mit einem Programm überwachen zu lassen. Dabei soll das Programm mit Hilfe von statistischen Erhebungen herausfinden, ob die Berechnung schon gestoppt werden kann. Im Rahmen der Bachelorthesis wurde dieses Programm entwickelt, programmiert und eingeführt. Im Folgenden wird auf die Umsetzung dieses Programms eingegangen.

Um die Berechnungen automatisch zu stoppen, sollten zuvor Abbruchkriterien definiert werden. Dafür wird zunächst der Mittelwert einer Betrachtungsgröße ermittelt. Eine gute Möglichkeit, die Streuung um den Mittelwert zu beurteilen, stellt dabei die Standardabweichung dar (vgl. Abschnitt 2.4.2). Diese allein ist jedoch noch nicht hinreichend genau, denn auch bei einer gleichmäßigen Steigung ist die Streuung sehr gering und könnte die Berechnung fälschlicherweise anhalten. Wenn die Werte noch zusätzlich mit einer linearen Regressionsanalyse bewertet werden, könnte dies verhindert werden. Dabei erhält man eine lineare Gleichung. Die Steigung dieser gibt einen Anhaltswert darüber, ob die Werte noch in eine Richtung tendieren oder aber der Mittelwert als konstant anzunehmen ist, da die Steigung sehr klein ist. Diese beiden Auswertungen sollen in einem definierten Bereich stattfinden. Die Auswertung wird lediglich auf ein vorher festgelegtes Berechnungsintervall, beispielsweise die letzten 50 Simulationssekunden, angewandt. Als Abbruchkriterium wird zum einen eine maximale Standardabweichung vorgegeben. Zum anderen wird mit Hilfe der Steigung  $m$  der

linearen Regressionsanalyse eine Differenzhöhe über Gleichung (4.14) bestimmt, wobei  $\Delta x$  gleich der gewählten Intervalllänge ist. Auch für diesen Wert wird ein maximales Abbruchkriterium festgelegt. Diese beiden Kriterien können beliebig kombiniert werden.

$$h = |\Delta x \cdot m| \quad (4.14)$$

Das entwickelte Programm überprüft nun, ob die Abbruchkriterien unterschritten wurden. Ist dies der Fall, gibt es einen Hinweis, dass die Berechnung beendet wird und die Lösung auf das nächste Berechnungsgitter übertragen werden kann. Feinere Berechnungsgitter sollen genauere Ergebnisse liefern. Deshalb sind die Abbruchkriterien an das jeweilige Gitter anzupassen.

Um die im vorherigen Abschnitt definierten Berechnungsmethoden miteinander vergleichen zu können, sind die Abbruchkriterien für die einzelnen Berechnungsgitter identisch zu wählen. Die endgültige Wahl des Abbruchkriteriums wird in Abschnitt 5.3 diskutiert.



## 5 Auswertung

### 5.1 Dämpfung der Störwellen im Berechnungsgebiet

Die Auswertung der Berechnungen, die mit den Parametervariationen aus Tabelle 4.1 gerechnet wurden, findet im Folgendem statt. Hierfür wird der Verlauf der Druckkraft visualisiert, da in dieser die durch Wellen hervorgerufenen Oszillation am deutlichsten erkennbar wird. Zur Beibehaltung des Überblicks sind ein paar signifikante Verläufe ausgewählt. Diese sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Die Farbe des Graphen ist zusätzlich mit aufgelistet.

Nummer	$\gamma$	$x_1$	$x_2$	Farbe
1	0.0	0.0	0.0	grün
5	0.5	0.4	1.6	orange
7	0.5	0.8	2.0	rot
8	0.5	1.2	2.0	blau

**Tabelle 5.1:** Ausgewählte Wellendämpfungsparameter zur Visualisierung

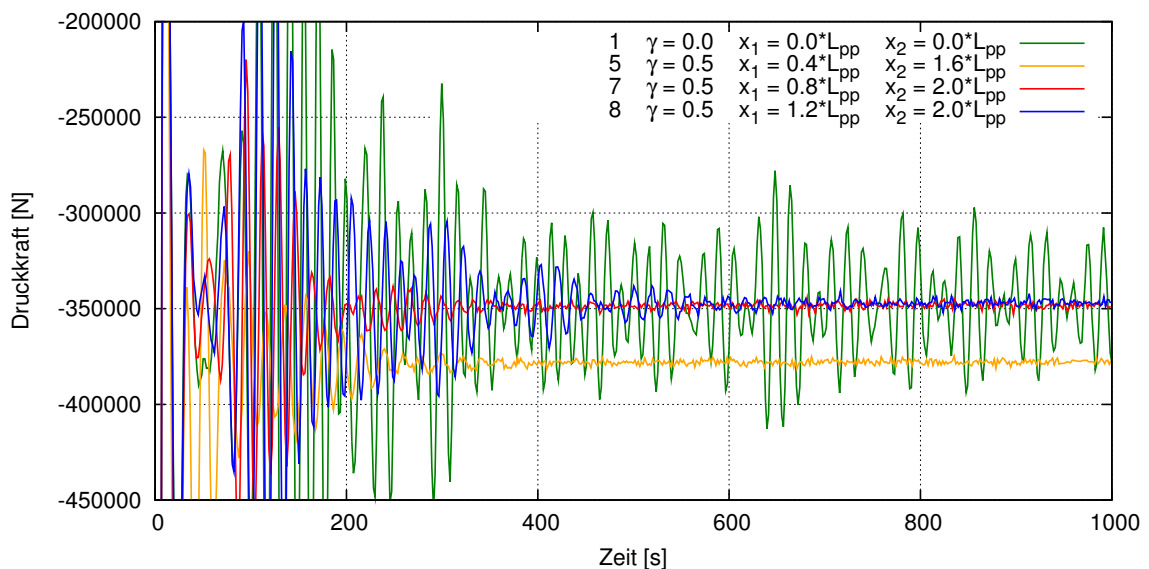
Die Berechnung mit den 1. Wellendämpfungsparameter soll zeigen, was bei einer Berechnung ohne Wellendämpfung zu erwarten ist. Die Berechnungen mit den Wellendämpfungsparametern 5, 7 und 8 zeigen sehr gut, welche Unterschiede entstehen können, wenn die Volumenkraft aus Gleichung (4.1) in verschiedenen Entfernungen angesetzt wird.

#### 5.1.1 Originalmaßstab

Abbildung 5.1 stellt den Verlauf der Druckkraft bei der Geschwindigkeit von  $12.45 \text{ kn}$  dar. Zunächst ist zu erkennen, dass die Druckkraft nach dem Startvorgang stark zu oszillieren beginnt. Dabei nehmen die Amplituden mit fortschreitender Simulationszeit ab. Bei den 1. Wellendämpfungsparametern findet keine Dämpfung statt. Obwohl die Druckkraft konstant um einen Mittelwert schwingt, sind die auftretenden Amplituden deutlich zu hoch. Im Mittel bleibt eine Amplitude von näherungsweise  $50\,000 \text{ N}$ , und

damit ca. 10 % der gesamten Widerstandskraft, erhalten. Der Verlauf der Druckkraft mit angeschalteter Wellendämpfung und den 5. Wellendämpfungsparametern zeigt, dass die Oszillation bei angeschalteter Wellendämpfung sehr stark verringert werden kann. In diesem Fall ist  $x_1$  jedoch mit  $0.4 \cdot L_{pp}$  deutlich zu dicht am Schiff, was zu einer Verfälschung in der Druckkraft führt. Diese fällt um nahezu 50 000 N stärker aus als sie tatsächlich wäre. Somit kann bewiesen werden, dass die Wellendämpfung nicht zu dicht am Schiff angesetzt werden sollte.

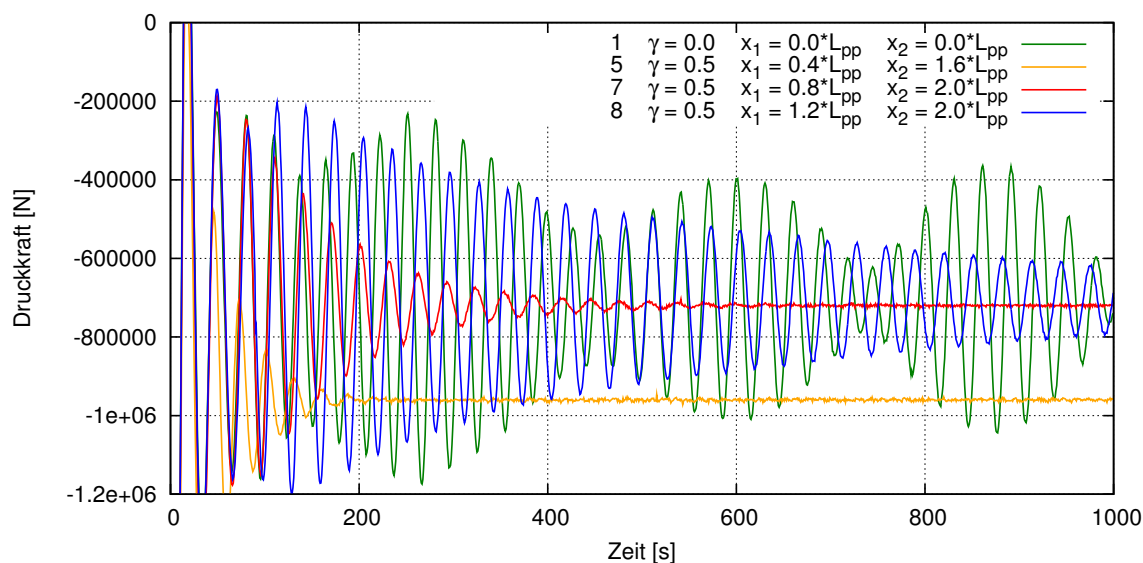
Bei den 7. Wellendämpfungsparametern kommt es zum erwünschten Ergebnis. Die Oszillation klingt schnell ab und die Druckkraft schwingt mit minimaler Amplitude auf einem Mittelwert, welcher genau der Mittelwert ist, um den die Druckkraft mit den 1. Wellendämpfungsparametern schwingt. Lässt man jedoch die Intensität wie bei den 8. Wellendämpfungsparametern bei  $x_1 = 1.2 \cdot L_{pp}$  hochfahren, so wird die Oszillation zwar auch ausgedämpft, dies benötigt jedoch mehr Zeit als zuvor. Der Grund dafür ist, dass die Wellendämpfung in y-Richtung mit dem gewählten Abstand von  $x_1 = 1.2 \cdot L_{pp}$  nicht mehr im Berechnungsgebiet liegt. Die Entfernung zum Rand des Berechnungsgebietes in y-Richtung ist zur Erinnerung mit einer Länge von  $1 \cdot L_{pp}$  generiert worden. Eine Störwelle kann den y-Rand erreichen, ohne vorher gedämpft zu werden. Dies kann zu einer Reflektion führen, wobei die Welle zurück in Richtung des Schiffsrumpfes läuft. Infolgedessen sollte der Start der Wellendämpfung im Berechnungsgebiet erfolgen,  $x_1$  sollte diesbezüglich kleiner als  $1 \cdot L_{pp}$  sein.



**Abbildung 5.1:** Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen mit bei 12.45 kn und FS

Betrachtet man nun Abbildung 5.2 mit der Geschwindigkeit 24.90 kn, so erkennt man, dass bei der zuletzt betrachteten Einstellung mit den 8. Wellendämpfungsparametern, die Amplitude stetig, aber äußerst langsam abklingt. Durch die doppelte Geschwindigkeit sind sehr viel stärkere Störwellen entstanden. Diese waren bei der gewählten  $Fr$ -Zahl zu erwarten, und können nur deutlich langsamer gedämpft werden. Auch

hier oszilliert die Druckkraft ohne Wellendämpfung kontinuierlich weiter, wobei dies mit einer mittleren Amplitude von ungefähr  $200\,000\text{ N}$  geschieht. Bei den 5. Wellendämpfungsparametern erfolgt zwar die schnellste Dämpfung, die Oszillation ist nach ca. 200 Simulationssekunden verschwunden, jedoch ist der erreichte Mittelwert auch hier deutlich verfälscht. Der absolute Wert des Mittelwertes ist hier um  $350\,000\text{ N}$  höher gegenüber den anderen Wellendämpfungsparametern, welche um ca.  $750\,000\text{ N}$  oszillieren. Die 7. Wellendämpfungsparameter führen wie zuvor zu dem gewünschten Verhalten. Die Oszillation wird ausgedämpft und ein nahezu konstanter Wert um  $750\,000\text{ N}$  erreicht.



**Abbildung 5.2:** Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen mit bei  $24.90\text{ kn}$  und FS

Einen Überblick über die Auswirkung der Wahl von Wellendämpfungsparametern nach  $1\,000$  Simulationssekunden auf die Auslenkung (engl.: elevation) der freien Oberfläche schaffen die Abbildungen A.7 und A.8. Man erkennt, dass sich auf beiden Bildern Wellenberge (rot eingefärbte Bereiche) und Wellentäler (blau eingefärbte Bereiche) am Schiffsrumpf gebildet haben. Das erste Bild weist zusätzlich dazu Wellen auf, die sich nach  $1\,000$  Simulationssekunden weiter entfernt vom Schiff befinden. Dies liegt an der nicht vorhandenen Wellendämpfung der 1. Wellenparametereinstellung. Die Wellen sind unphysikalisch und verursachen den in Abbildung 5.2 dargestellten Druckkraftverlauf, da sie im Berechnungsgebiet regelrecht vor- und zurückwandern. Im zweiten Bild, bei dem die 7. Wellendämpfungsparameter wirken, sind die unphysikalischen Wellen erfolgreich ausgedämpft.

## 5.1.2 Modellmaßstab

In den Abbildungen A.9 und A.10 ist analog zum Originalmaßstab der Verlauf der Druckkräfte im Modellmaßstab aufgeführt. Diese verlaufen näherungsweise identisch. Die Wellendämpfung ist maßstabsunabhängig.

## 5.1.3 Zusammenfassung

Mit Hilfe des Vergleichs aller Variationen der Wellendämpfungsparameter ist zu erwähnen, dass eine Variation der Intensität  $\gamma$  bei gleichbleibendem Abstand von  $x_1 = 0.8 \cdot L_{pp}$  zu  $x_2 = 2.0 \cdot L_{pp}$  keine nennenswerte Veränderung des Verlaufes in der Druckkraft nach sich zieht. Eine Variation im zweiten Abstand  $x_2$  bewirkt ebenfalls keine Verbesserung oder Verschlechterung. Sobald  $x_1$  jedoch kleiner ausfällt, wird die Druckkraft verfälscht. Es gibt somit mehrere ideale Einstellung der Wellendämpfungsparameter. Für die weiteren Auswertungen wird sich jedoch auf eine Einstellung festgelegt. Die Wellen werden fortan mit einer Dämpfungsintensität von  $\gamma = 0.5$  gedämpft. Dabei ist die Intensität im Abstand von  $x_1 = 0.8 \cdot L_{pp}$  zu  $x_2 = 2.0 \cdot L_{pp}$  hochzufahren.

Es ist festzuhalten, dass die hier errechneten Druckkräfte nicht den wahren Wert der Druckkraft widerspiegeln. Da hier auf einem sehr groben Netz gerechnet wurde, sind die Werte nicht repräsentabel für die Leistungsprognose von Schiffen. Das Ziel, durch den Startvorgang entstandene Störwellen zu beseitigen, wurde jedoch erreicht.

Störwellen gänzlich beim Startvorgang zu vermeiden, könnte zudem möglicherweise durch einen physikalischen Anfahrvorgang erreicht werden, bei dem die Geschwindigkeit von  $0 \text{ kn}$  auf die gewünschte Geschwindigkeit hochgefahren wird.

## 5.2 Dämpfung der Schiffsbewegungen

Die Auswertung der in Tabelle 4.2 aufgelisteten Variationen der Schiffsdämpfung erfolgt zunächst anhand des Originalmaßstabes. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die hier verwendeten Faktoren  $n_z$  und  $n_{yy}$  auf die in Abschnitt 4.2.2 eingeführte Referenzzeit beziehen.

### 5.2.1 Originalmaßstab

Abbildung A.11 stellt den Verlauf des Tauchens über der Simulationszeit bei der Geschwindigkeit von  $12.45 \text{ kn}$  dar. Dabei ist festzustellen, dass die Tauchbewegung umso schneller auf das Niveau des Endwertes läuft, je geringer der Faktor  $n_z$  gewählt wird. Die Oszillation in der Tauchbewegung nimmt demgegenüber ab, je größer  $n_z$  ausfällt.



Allerdings ist deutlich zu erkennen, dass bei fortschreitender Simulationszeit mit der Schiffsdämpfung von  $n_z = 0.5$  weiterhin eine Oszillation vorherrscht. Die Variante mit  $n_z = 2.0$  ist hinfällig, da der Endwert auch nach 500 Simulationssekunden noch nicht endgültig erreicht ist. Es ist eine Dämpfung anzustreben, bei der minimale Oszillationen stattfinden. Somit wird die Dämpfung mit dem Faktor  $n_z = 1.0$  gegenüber  $n_z = 0.5$  bevorzugt. Die Veränderung der Tauchbewegung mittels einer Variation des Faktors  $n_{yy}$  ist minimal.

In Abbildung A.12 ist nun der Verlauf des Stampfens über der Simulationszeit bei der Geschwindigkeit von  $12.45 \text{ kn}$  dargestellt. Hier überwiegt der Faktor  $n_{yy}$ , wobei eine Veränderung des Faktors  $n_z$  zusätzlich kleinere Änderungen der Stampfbewegung verursacht. Analog zur Tauchbewegung kann festgestellt werden: je geringer der Faktor  $n_{yy}$  gewählt wird, desto schneller kann die Stampfbewegung auf das Niveau des endgültigen Endwertes laufen. Aber auch hier sind die Oszillationen bei kleineren Dämpfungszeiten zu stark. Anzustreben wäre eine Dämpfungszeit, die weniger oszilliert als Berechnungen mit dem Faktor  $n_{yy} = 1.0$ , jedoch schneller auf dem Endwert laufen als Berechnungen mit dem Faktor  $n_{yy} = 2.0$ . Der Faktor  $n_{yy} = 1.5$  könnte diese Kriterien erfüllen.

Es erfolgt eine erneute Berechnung, wobei für die Dämpfung der Tauchbewegung der Faktor  $n_z = 1.0$  und für die Dämpfung der Stampfbewegung der Faktor  $n_{yy} = 1.5$  gewählt werden. In den Abbildungen A.13 und A.14 sind die dazugehörigen Verläufe dargestellt. Die Verläufe der Parametereinstellung 1 und 4 sind zusätzlich visualisiert worden, um einen Überblick über die Veränderung der Bewegung zu erhalten. Die Tauchbewegung hat sich erwartungsgemäß nicht verändert. Die Stampfbewegung erfolgt mit einer geringeren Oszillation als mit dem Faktor  $n_{yy} = 1.0$  und ist schneller auf dem Endwert als der Verlauf mit dem Faktor  $n_{yy} = 2.0$ . Die gefundenen Dämpfungsparameter für die Schiffsbewegung sind für diese Geschwindigkeit zweckmäßig.

Vergleichbar dazu werden nun die Abbildungen A.15 und A.16 betrachtet. Hierbei werden die Schiffsbewegungen bei der Geschwindigkeit von  $24.90 \text{ kn}$  ausgewertet. Das Verhalten der Tauch- und Stampfbewegungen ist vergleichbar zur Geschwindigkeit von  $12.45 \text{ kn}$ . Wie zuvor hat eine Veränderung des Faktors  $n_{yy}$  keine Änderung der Tauchbewegung zur Folge. Auch hier ist festzustellen, dass die Tauchbewegungen mit  $n_z = 0.5$  weiterhin nach 500 Simulationssekunden noch oszillieren. Die Verläufe mit dem Faktor  $n_z = 2.0$  nähern sich zwar deutlich schneller an als bei der vorherigen Geschwindigkeit, es muss jedoch ein geschwindigkeitsunabhängiger Wert gefunden werden, damit das Verhalten bei jeder Geschwindigkeit zweckmäßig ist. Auch hier ist die Kurve mit  $n_z = 1.0$  am besten. Sie nähert sich schnell an den Endwert an und besitzt eine geringe Oszillation.

Die Oszillation in der Stampfbewegung fällt stärker aus als zuvor. Bei allen Dämpfungsparametern ist ein überkritisches Verhalten festzustellen, d.h. dass die Bewegung zunächst über den Endwert hinaus schwingt. Die Oszillation bei Faktor  $n_{yy} = 1.0$  ist nach Beendigung der Simulation jedoch noch etwas höher als die Oszillation mit Rechnung bei Faktors  $n_{yy} = 2.0$ .

Die Dämpfungsparameter mit  $n_z = 1.0$  und  $n_{yy} = 1.5$  sollen auch hier auf ihre Anwendbarkeit getestet werden. Hierfür wird analog zur Geschwindigkeit  $12.45 \text{ kn}$  die neue Parametereinstellung mit den Parametereinstellungen 1 und 4 verglichen. In den Abbildungen A.17 und A.18 sind die Verläufe gegenübergestellt. Die Tauchbewegung läuft mit schnell abfallender Oszillation gegen den Endwert. Bei der Stampfbewegung kommt es zunächst zu einer größeren Oszillation, die aber im Laufe der Simulationszeit auf das Niveau von der Parametereinstellung 4 gedämpft wird. Zur Vermeidung des Überschwingens könnte  $n_{yy}$  deutlich größer gewählt werden. Dies würde jedoch dazu führen, dass die Stampfbewegungen sehr träge in Richtung des Endwertes laufen. Demzufolge ist die Einstellung mit den Faktoren  $n_z = 1.0$  und  $n_{yy} = 1.5$  ebenso für die hier vorliegenden Bedingungen zweckmäßig.

## 5.2.2 Modellmaßstab

Zum Vergleich mit den erlangten Ergebnissen im Originalmaßstab sind die Tauch- und Stampfbewegungen des Modellmaßstabes analog zur vorherigen Visualisierung in den Abbildungen A.19 bis A.26 dargestellt. Die Verhaltensweisen sind ähnlich zu denen im Originalmaßstab, lediglich die Größenordnung ist verschieden. Die gewählten Faktoren  $n_z = 1.0$  und  $n_{yy} = 1.5$  berücksichtigen den Skaleneffekt und kommen auch im Modellmaßstab zu geeigneten Verläufen, die schnell und ohne große Oszillation zum endgültigen Endwert laufen.

## 5.2.3 Zusammenfassung

Durch die durchgeführte Analyse der Schiffsbewegungs-dämpfung konnte eine unabhängige Dämpfungsparametereinstellung gefunden werden. Als Vereinbarung kann die Parametereinstellung mit den Faktoren  $n_z = 1.0$  und  $n_{yy} = 1.5$  als praxistauglich angenommen werden.

# 5.3 Übertragen von Lösungen auf feinere Berechnungsgitter

## 5.3.1 Finden eines geeigneten Abbruchkriteriums

Bei einer Untersuchung von bereits durchgeführten Leistungsprognosen konnte festgestellt werden, dass viele Berechnungen bereits weit vor Beendigung der eingestellten Endzeit eine Konvergenz im Verlauf der Betrachtungsgrößen aufwiesen. Über die in Abschnitt 4.3.3 eingeführte statistische Auswertung kann die Konvergenz frühzeitig erkannt werden. Somit wäre eine Verringerung der Berechnungszeiten

möglich. Aus diesem Grund muss zunächst ein geeignetes Abbruchkriterium gefunden werden. Es gilt, je feiner das Berechnungsgitter ist, desto feiner sollte das Abbruchkriterium sein. Hierbei sollte beachtet werden, dass die Größenordnung der Ergebnisse - Tiefertauchungen, Stampfwinkel und Widerstandskräfte - abhängig von den äußeren Gegebenheiten und dem Berechnungsmaßstab sind. Ein absolutes Abbruchkriterium in Form von der Standardabweichung und Differenzhöhe lässt sich also nicht verallgemeinern. Um die Skaleneffekte und die verschiedenen Größenordnungen in den Betrachtungsgrößen zu berücksichtigen, ist es sinnvoll, ein dimensionsloses Abbruchkriterium einzuführen. Hierfür wird die Standardabweichung und die Differenzhöhe des betrachteten Abschnittes auf den Mittelwert der untersuchten Größe, wie beispielsweise der Tiefertauchung, bezogen. Diese Option wird dem entwickelten Programm hinzugefügt.

Die Auswahl der Abbruchkriterien sollte die Unabhängigkeit von der Betrachtungsgröße, des Maßstabes und der äußeren Gegebenheiten berücksichtigen. Zunächst soll die Berechnung als ausreichend konvergiert beurteilt werden, sobald die Standardabweichung und die Differenzhöhe der Betrachtungsgröße weniger als 1% des Mittelwertes betragen. Dieser Wert erwies sich bei einigen kleineren Untersuchungen als brauchbar und wird somit im Folgenden hinterfragt und bewertet. Für die durchgeführten Rechnungen gilt: Das entwickelte Programm wird automatisch alle 5 Minuten ausgeführt und wertet die letzten 25 Simulationssekunden statistisch aus. Sofern die definierten Abbruchkriterien unterschritten werden, wird die Rechnung durch das Programm gestoppt und ggf. auf das feine Berechnungsgitter übertragen.

Bei der Anwendung sollte jedoch noch Folgendes beachtet werden. Als Endergebnis jeder Berechnungsmethode soll die Widerstandskraft ermittelt werden, das bedeutet, dass auf dem feinsten Berechnungsgitter die Widerstandskraft eine übergeordnete Rolle spielt. Die Rechnungsüberwachung muss folglich auf die Konvergenz der Widerstandskraft abzielen. Demgegenüber spielt bei den gröberen Berechnungsgittern die Schwimmelage und das Wellenbild eine übergeordnete Rolle, die Widerstandskraft ist dabei eher von untergeordnetem Interesse. Aufgrund dessen erfolgt auf groben Berechnungsgittern die Rechnungsüberwachung über die Konvergenz in der Schwimmelage. Es müssen die Tauch- und Stampfbewegungen ausgewertet werden.

### 5.3.2 Übertragen von Lösungen im Originalmaßstab

Das Übertragen von Lösungen wird zunächst mit Hilfe der in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Berechnungsmethoden im Originalmaßstab durchgeführt. Diese Untersuchung findet mit den zwei vorgestellten Geschwindigkeiten von  $u_1 = 24.90 \text{ kn}$  und  $u_2 = 12.45 \text{ kn}$  statt. Die in den vorherigen Auswertungen gefundenen Parametereinstellungen bezüglich der Wellendämpfung und der Schiffsbewegungen finden dabei ihre Anwendung.

In den Abbildungen A.27 bis A.29 ist die Widerstandskraft, das Tauchen und das Stampfen des Schiffes über der Simulationszeit bei der Geschwindigkeit von 12.45 kn aufgetragen. Das Gleiche erfolgt in den Abbildungen A.30 bis A.32 für die Geschwindigkeit von 24.90 kn. Zur Abgrenzung der einzelnen Berechnungsmethoden sind diese in einheitlichen Farbtönen geplottet. Der Graph *ohne Übertragung* ist in Magenta, die *einfache Übertragung* ist in Blautönen und die *Kaskade* ist in Grüntönen dargestellt. Der sich einstellende Mittelwert ist rot gekennzeichnet.

Beim Startvorgang des jeweiligen ersten Berechnungsgitters der Berechnungsmethoden kommt es zu einer Oszillation in allen drei Betrachtungsgrößen. Am Deutlichsten wird dies anhand der Widerstandskraft. Im Falle der Berechnungsmethoden, die den Übertragungsvorgang beinhalten, werden die Berechnungen erfolgreich gestoppt, sobald das Tauchen und das Stampfen die zuvor definierten Abbruchkriterien von 1% erfüllen. Nach der erfolgreichen Übertragung erfolgt eine erneute Oszillation in der Widerstandskraft. Die Amplituden sind dabei aber deutlich kleiner. Zusätzlich dazu verändert sich die Widerstandskraft durch das Übertragen meist stark, was durch die bessere Auflösung der Widerstandskräfte auf feineren Gittern zurückzuführen ist. Bei beiden Geschwindigkeiten schwingen die mittleren Widerstandskräfte des 2. und 3. Berechnungsgitters auf demselben Level. Durch Berücksichtigung der *Layer*-Schicht im 4. Berechnungsgitter wird der Reibungswiderstandes besser erfasst. Das führt schließlich zu einer erneuten Änderung der Widerstandskraft. Die 3 Berechnungsmethoden konvergieren in etwa gegen den gleichen Endwert. Auffällig ist jedoch, dass sich die im 1. Berechnungsgitter der *Kaskade* einstellenden Endwerte des Tauchens und Stampfens von dem sich einstellenden Mittelwert des 4. Berechnungsgitter abweicht. Dies liegt an der Tatsache, dass durch die grobe Verfeinerung am Schiff noch keine exakte Lösung errechnet werden kann. Je feiner das Berechnungsgitter wird, desto näher kommen die Lösungen des Tauchens und Stampfens an den exakten Wert.

Beim Tauchen in Abbildung A.28 stellt sich kein gemeinsamer Mittelwert ein. Die Änderung bezüglich des gewählten Tiefgangs des Schiffes von  $T_S = 13.6 \text{ m}$  beträgt dabei allerdings weniger als 1 ‰. Die Differenz der einzelnen Mittelwerte ist also in diesem Fall zu vernachlässigen. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die Widerstandskraft durch diese minimalen Unterschiede nicht beeinflusst wird. Im Allgemeinen war eine Abweichung im Tauchen und Stampfen des 4. Berechnungsgitters zu erwarten, da diese Betrachtungsgrößen hier nur noch eine untergeordnete Rolle spielen und vom Abbruchkriterium nicht mehr berücksichtigt werden. Durch längere Berechnungszeiten könnte sich auch hier ein gleicher Mittelwert einstellen.

Um Gewissheit über die Konvergenz der Widerstandskraft zu erhalten, sollten die Simulationszeiten auf dem feinsten Berechnungsgitter jedoch ein wenig größer ausfallen. Als Beispiel sind die Verläufe der Widerstandskraft der einfachen Übertragung und der Kaskadenrechnung in Abbildung A.30 auf dem 4. Berechnungsgitter zu betrachten. Zur Erinnerung: das Betrachtungsintervall des Abbruchkriteriums liegt bei 25

Sekunden. Die Widerstandskraft oszilliert und befindet sich dabei erst seit einer halben Wellenlänge in dem Bereich des sich einstellenden Mittelwertes. Um gegebenenfalls noch auftretende Änderungen in der Widerstandskraft berücksichtigen zu können, sollte das Betrachtungsintervall zum Beispiel auf 50 Sekunden vergrößert werden.

Die CPU-Zeit stellt ein geeignetes Maß für die Beurteilung der genutzten Prozessressourcen dar. Sie gibt an, wie lange die Prozessoren insgesamt gerechnet haben. In der bei laufender Berechnung geschriebenen Logdatei wird unter anderem die *ExecutionTime* (dt.: Durchführungszeit) aufgeführt. Sie gibt die tatsächliche Berechnungszeit an. Multipliziert mit der Anzahl der Prozessoren erhält man die CPU-Zeit (Gleichung (5.1)).

$$\text{CPU-Zeit} = \text{ExecutionTime} \cdot n\text{Proc} \quad (5.1)$$

Berechnungsmethode \ Netz	Netz				Gesamt
	1	2	3	4	
$v = 12.45 \text{ kn}$					
ohne Übertragung	–	–	–	516	516
einfache Übertragung	–	–	97	209	241
Kaskade	6	40	44	82	172
$v = 24.90 \text{ kn}$					
ohne Übertragung	–	–	–	1122	1122
einfache Übertragung	–	–	163	141	304
Kaskade	8	34	34	141	217

**Tabelle 5.2:** CPU-Zeit pro Simulation in Stunden mit FS

In Tabelle 5.2 sind die CPU-Zeiten der einzelnen Berechnungsgitter im Originalmaßstab aufgelistet. Die Berechnungen mittels *Kaskade* benötigen trotz der Berechnung auf 4 Berechnungsgittern am wenigsten CPU-Zeit. Die gesamte CPU-Zeit beläuft sich bei der Geschwindigkeit von  $12.45 \text{ kn}$  auf 172 Stunden und bei  $24.90 \text{ kn}$  auf 217 Stunden. Berechnungen mit *einfacher Übertragung* sind etwas langsamer mit 241 bzw. 304 Stunden. Die Berechnungen *ohne Übertragung* benötigen hingegen das drei- bzw. fünffache an CPU-Zeit. Dies ist durch die anfängliche Oszillation in den Betrachtungsgrößen zu begründen. Bei Berechnungen mit gröberen Berechnungsgittern kann die anfängliche Oszillation deutlich schneller gedämpft werden, als es auf feinen Berechnungsgittern der Fall ist.

Die erste Untersuchung zeigt, dass das Übertragen von Lösungen auf feinere Berechnungsgitter durchaus sinnvoll ist. Die Verwendung der Abbruchkriterien soll im nächsten Schritt weiter optimiert werden.

### 5.3.3 Optimierung der Abbruchkriterien

Bei genauem Betrachten fällt auf, dass die Widerstandskraft meist schon ein konstantes Level erreicht hat, bevor das Tauchen oder Stampfen konvergiert ist. Es bietet sich an, die drei Betrachtungsgrößen auf einmal auszuwerten, wobei auf den Berechnungsgittern ohne *Layer*-Schicht statt der gesamten Widerstandskraft nur die Druckkraft betrachtet wird. Der reibungsbehaftete Anteil könnte fehlerbehaftet sein, da die Grenzschicht des Schiffes nicht genügend aufgelöst ist. Der Widerstand spielt auf den größeren Berechnungsgittern eine untergeordnete Rolle und kann mit nicht allzu feinen Abbruchkriterien betrachtet werden. Je feiner das Berechnungsgitter wird, desto feiner ist jedoch auch das Abbruchkriterium zu wählen. In diesem Versuch werden die Abbruchkriterien für die ersten drei Berechnungsgitter gesondert eingestellt und nicht wie zuvor jeweils auf 1% der Differenzhöhe bzw. Standardabweichung gesetzt. Lediglich das 4. Berechnungsgitter wird zur Vergleichbarkeit mit dem vorherigen Abbruchkriterium berechnet. In Tabelle 5.3 sind die gewählten Abbruchkriterien aufgelistet. Die Untersuchung erfolgt exemplarisch mittels der Geschwindigkeit von 24.90 *kn* im Originalmaßstab.

Berechnungsgitter		Druckwiderstand	Tauchen	Stampfen
1	Standardabweichung	10	5	5
	Differenzhöhe	10	5	5
2	Standardabweichung	5	2.5	5
	Differenzhöhe	5	2.5	5
3	Standardabweichung	3.5	2.5	2.5
	Differenzhöhe	3.5	2.5	2.5

**Tabelle 5.3:** Abbruchkriterien in Prozent des Mittelwertes für die einzelnen Berechnungsgitter

Analog zu dem vorherigen Abbruchkriterium sind in den Abbildungen A.33 bis A.35 die Verläufe der Widerstandskraft, des Tauchens und des Stampfens aufgezeigt. Die auftretenden Verläufe sind vergleichbar mit denen aus der vorherigen Untersuchung. Dies war zu erwarten, da an dem Rechnungsverfahren selbst keine Veränderung vorgenommen wurde. Erkennbar werden nun Unterschiede in Simulations- und CPU-Zeit, welche in Tabelle 5.4 aufgelistet sind. Die Berechnung *ohne Übertragung* erfährt keine Veränderung, da auf dem 4. Berechnungsgitter nach wie vor das gleiche Abbruchkriterium von 1% in der Widerstandskraft gilt. Bei der *einfachen Übertragung* sind die Berechnungszeiten auf dem 3. Berechnungsgitter angestiegen von 163 auf 230 CPU-Stunden. Demgegenüber ist die Berechnungszeit auf dem 4. Berechnungsgitter auf 125, also um 16 CPU-Stunden, reduziert. Eine Begründung hierfür ist, dass sich die Oszillation auf dem 3. Berechnungsgitter vor dem Übertragungsvorgang verringert hat, wofür die Berücksichtigung der Druckkraft als Abbruchkriterium verantwortlich

ist. Aus dieser Erkenntnis ist zu schließen, dass eine Verringerung der Oszillation der Widerstandskraft in der Rechnung zu einer schnelleren Konvergenz verhilft. Bei der *Kaskade* sind die CPU-Zeiten auf den ersten drei Berechnungsgittern ein wenig geringer ausgefallen als zuvor. Das 4. Berechnungsgitter wird nun nach insgesamt 65 statt 76 CPU-Stunden gestartet. Dieses rechnet dann 146 CPU-Stunden. Insgesamt ist eine Ersparnis von 6 CPU-Stunden, also ca. 3% zur vorherigen Einstellung, festzustellen. Die Veränderung durch die Optimierung ist nur minimal.

Berechnungsmethode \ Netz	1	2	3	4	Gesamt
	$v = 24.90 \text{ kn}$				
ohne Übertragung	–	–	–	1 122	1 122
einfache Übertragung	–	–	230	125	355
Kaskade	8	28	29	146	211

**Tabelle 5.4:** CPU-Zeit pro Simulation bei  $v = 24.90 \text{ kn}$  und FS nach Optimierungsversuch

Es bleiben die unterschiedlichen Mittelwerte beim Tauchen und Stampfen. Um diese einander anzunähern, wird in der letzten Optimierungsstufe beim 4. Berechnungsgitter zusätzlich das Stampfen und Tauchen betrachtet. In Tabelle 5.5 sind die gewählten Abbruchkriterien aufgelistet. Die hierdurch erhaltenen Ergebnisse werden in den Abbildungen A.36 bis A.38 dargestellt.

Berechnungsgitter		Widerstandskraft	Tauchen	Stampfen
4	Standardabweichung	1.0	2.5	2.5
	Differenzhöhe			

**Tabelle 5.5:** Abbruchkriterium in Prozent des Mittelwertes für das 4. Berechnungsgitter

Die Tauch- und Stampfbewegungen konvergieren zumindest bei der *einfachen Übertragung* und der *Kaskade* gegen den gleichen Wert. Die Berechnung *ohne Übertragung* hat beim Stampfen nahezu den gleichen Mittelwert erreicht wie bei den beiden anderen Berechnungsmethoden. Um jedoch gleiche Werte beim Tauchen zu erhalten, müsste man voraussichtlich noch einmal das Doppelte an Berechnungszeit investieren.

Betrachtet man allerdings die CPU-Zeiten in Tabelle 5.6, kann man feststellen, dass sich die Zeiten für die *einfache Übertragung* bzw. *Kaskade* nahezu verdoppelt haben. Sie liegen nun bei 642 bzw. 503 Stunden. *Ohne Übertragung* beträgt die Zeit sogar 1 384 Stunden. Wie zuvor bereits erwähnt, fällt auf, dass die verhältnismäßig kleinen Bewegungen des Schiffes keinen Einfluss auf die Widerstandskraft haben. Somit ist eine Auswertung der Schiffsbewegungen auf dem letzten Berechnungsgitter nur dann sinnvoll, wenn als Ziel der Untersuchung die genaue Schwimmlage herauszufinden ist.

Bei der Leistungsprognose von Schiffen ist im Regelfall aber nur die Widerstandskraft von Interesse.

Berechnungsmethode \ Netz	1	2	3	4	Gesamt
	$v = 24.90 \text{ kn}$				
ohne Übertragung	–	–	–	1 384	1 384
einfache Übertragung	–	–	230	412	642
Kaskade	8	28	29	438	503

**Tabelle 5.6:** CPU-Zeit pro Simulation bei  $v = 24.90 \text{ kn}$  und FS mit Variation der Abbruchkriterien

### 5.3.4 Übertragen von Lösungen im Modellmaßstab

Nach der Feststellung, dass die Leistungsprognose von Schiffen mit Hilfe der *Kaskade* im Originalmaßstab am zügigsten abläuft, folgt nun die Berechnung des Modellmaßstabes unter Anwendung des anfänglichen Abbruchkriteriums von 1%. Die Visualisierung der Betrachtungsgrößen erfolgt hier in der gleichen Reihenfolge wie für den Originalmaßstab. Es werden die Verläufe der Widerstandskraft gefolgt vom Tauchen und Stampfen aufgezeigt. In den Abbildungen A.39 bis A.41 geschieht dies für die Geschwindigkeit von  $12.45 \text{ kn}$ . In den Abbildungen A.42 bis A.44 für die Geschwindigkeit von  $24.90 \text{ kn}$ .

Bei den Verläufen der Betrachtungsgrößen ist grundsätzlich ein ähnliches Verhalten wie bei denen im Originalmaßstab festzustellen. Auch hier verändert sich die Widerstandskraft nach der Übertragung auf das nächst feinere Gitter deutlich und die Oszillationen nehmen mit fortschreitender Simulationszeit und Gitterfeinheit ab. Die mittlere Widerstandskraft ist bei den drei Berechnungsmethoden die gleiche. Allerdings sind erhebliche Unterschiede in der Tauchbewegung festzustellen. Bei der Geschwindigkeit  $12.45 \text{ kn}$  in Abbildung A.40 wird auf dem 1. Berechnungsgitter der *Kaskade* ein Endwert von ca.  $0.008 \text{ m}$  erreicht. Dieser ist viermal höher als der Endwert des 4. Berechnungsgitters. Im Originalmaßstab betrug dieser Unterschied lediglich das 1.4-fache. Das 1. Berechnungsgitter hat somit erhebliche Probleme, eine ungefähre Lösung zu berechnen. Bei der Geschwindigkeit von  $24.90 \text{ kn}$  schwingen die Betrachtungsgrößen plötzlich auf und verändern sich in eine Dauerschwingung. Bei der Berechnung mit Modellmaßstab ist der Einfluss der Turbulenz höher, da durch die kleineren *Re*-Zahlen die Zähigkeit zunimmt. Daher hat das Turbulenzmodell Probleme, denn die groben Berechnungsgitter sind für die turbulenten Grenzschichteffekte aus Abschnitt 2.2.2 nicht ausgelegt. Die dabei entstehenden Fehler gehen bei der Übertragung auf das nächste Berechnungsgitter über und können nur sehr träge beseitigt werden.



Bei der Betrachtung der dazugehörigen CPU-Zeiten in Tabelle 5.7 spiegeln sich umgekehrte Verhaltensmuster bezogen auf den Originalmaßstab wider. Bei beiden Geschwindigkeiten sind die CPU-Zeiten der Berechnungen *ohne Übertragung* am geringsten. Die *Kaskade* rechnet nahezu doppelt so lange, wobei die CPU-Zeiten beim 2. und 3. Berechnungsgitter deutlich länger ausfallen als dies noch im Originalmaßstab der Fall war. Ein Grund dafür ist, dass durch den Modellmaßstab deutlich kleinere Bewegungen vollzogen werden. Die sich einstellenden Tauchbewegungen liegen bei einer Größenordnung von bis zu  $10^{-3} m$  und die Stampfbewegungen von bis zu  $10^{-4} \circ$ . Bei einem Abbruchkriterium von 1% heißt dies, dass die Standardabweichung bzw. Differenzhöhe Werte von  $10^{-5} m$  bzw.  $10^{-6} \circ$  unterschreiten muss, damit die Berechnung als konvergiert betrachtet wird.

Berechnungsmethode \ Netz	Netz				Gesamt
	1	2	3	4	
$v = 12.45 kn$					
ohne Übertragung	–	–	–	239	239
einfache Übertragung	–	–	178	77	255
Kaskade	28	138	236	70	472
$v = 24.90kn$					
ohne Übertragung	–	–	–	274	274
einfache Übertragung	–	–	188	93	281
Kaskade	52	118	161	103	434

**Tabelle 5.7:** CPU-Zeit pro Simulation in Stunden mit MS

Um das Übertragen von Lösungen auf einem Modellmaßstab erfolgreich durchzuführen sind noch zahlreiche Untersuchungen notwendig. Einige Empfehlungen zur Beseitigung der genannten Probleme werden nachfolgend aufgeführt.

Zur Beseitigung der Turbulenzprobleme ließe sich beispielsweise auf dem größten Berechnungsgitter eine *Layer*-Schicht einfügen. Zur Verkürzung der CPU-Zeiten auf den größeren Berechnungsgittern sollten die Abbruchkriterien anders definiert werden. Einerseits könnte das relative Abbruchkriterium etwas weicher ausfallen, andererseits bestünde die Möglichkeit ein absolutes Kriterium zu verwenden. Hierbei sollte jedoch die ungefähre Größenordnung der sich einstellenden Bewegungen bekannt sein.

### 5.3.5 Bewertung der Benutzung von Abbruchkriterien

Die Benutzung der automatischen Berechnungsüberwachung mit Hilfe von Abbruchkriterien ist grundsätzlich erfolgreich abgelaufen. Die durchgeführten Berechnungen wurden mittels des benutzten Abbruchkriteriums angehalten. In keinem der Fälle erfolgte dies irrtümlich. Auch die Wahl eines relativen Abbruchkriteriums war in den hier berechneten Fällen vorteilhaft. Ungeachtet dessen können jedoch durchaus

Probleme auftreten. Während die Überwachung beim Originalmaßstab noch vollkommen problemlos ablief, tauchten beim Modellmaßstab Probleme auf. Grundsätzlich ließen sich die Berechnungen im Modellmaßstab auswerten, aber wegen der durch den Skaleneffekt bedingten kleineren Größenordnung in den Betrachtungsgrößen muss in diesem Fall das Abbruchkriterium etwas weicher eingestellt werden. So könnten die Berechnungszeiten noch etwas verkürzt werden. Es sollte abschließend noch bedacht werden, dass auch im Originalmaßstab kleine Größenordnungen in den Bewegungen des Schiffes auftauchen könnten. So könnte für die Stampfbewegung, welche häufig eine sehr kleine Größenordnung aufweist, ein absolutes Abbruchkriterium verwendet werden. In den meisten Fällen wird die Überwachung jedoch erfolgreich ablaufen.

### 5.3.6 Zusammenfassung

Das Übertragen von Lösungen auf feinere Berechnungsgitter ist im Originalmaßstab sinnvoll. Diese Berechnungsmethode bringt eine deutliche Verringerung der Berechnungszeiten gegenüber einer Berechnung auf einem Berechnungsgitter mit sich. Im Gegensatz dazu bewirken Berechnungen im Modellmaßstab keine Verringerung der Berechnungszeiten, wenn sie mit einer Übertragung von Lösungen auf feinere Berechnungsgitter berechnet wurden.

Das Programm zur Berechnungsüberwachung bewirkt eine zusätzliche Verringerung der Berechnungszeiten. Die im Zuge dieser Auswertung dargelegten Verbesserungsvorschläge müssen noch überprüft und ggf. in das Programm eingepflegt werden.

---

## 6 Fazit

Für das untersuchte Makro, welches Störwellen im Fernfeld des Schiffes dämpfen soll, ist eine geeignete Parametereinstellung gefunden worden. Diese berücksichtigt Skalen-Effekte und verläuft auch bei Veränderung der äußeren Bedingungen robust.

Dynamische und unphysikalische Schiffsbewegungen können mit den gefundenen, unabhängigen Parametereinstellungen erfolgreich gedämpft werden. Dadurch lässt sich die Bildung von neuen, unphysikalischen Wellen, die das Berechnungsgebiet störenden, erfolgreich verhindern.

Das Übertragen von Lösungen auf feinere Gitter erzielt im Originalmaßstab die gewünschten Ergebnisse. Es konnte gezeigt werden, dass das bereits angewandte Verfahren gegenüber einer Berechnung ohne eine Übertragung deutlich weniger Rechenleistung erfordert. Mit Hilfe von Abbruchkriterien kann eine Konvergenz in den signifikanten Betrachtungsgrößen frühzeitig erkannt werden.

Für Übertragungen von Lösungen im Modellmaßstab sind noch weitere Untersuchungen erforderlich, um auch diese Analyse robust ablaufen zu lassen.

Die Empfehlungen, die im Rahmen der Bachelorthesis gefunden wurden, finden bereits ihre Anwendung. Die benötigte Rechenleistung, um eine Leistungsprognose von Schiffen durchzuführen, konnte sich unter Zuhilfenahme der neuen Einstellungen halbieren. Eine Analyse, die zuvor ungefähr eine Woche benötigte, ist nun nach etwa 3 Tagen abgeschlossen.



# A Anhang

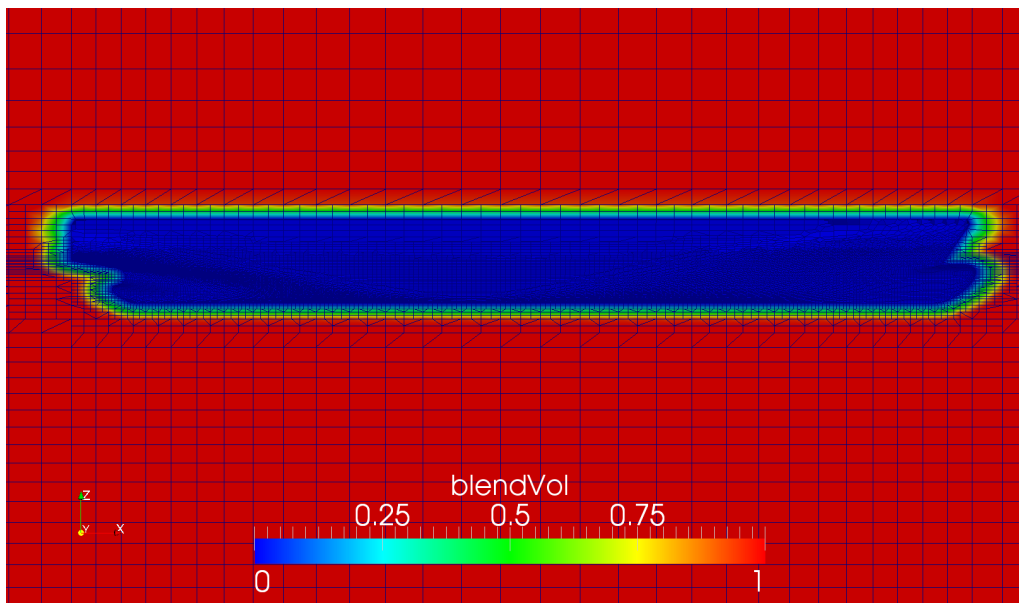


Abbildung A.1: Gitterverformung

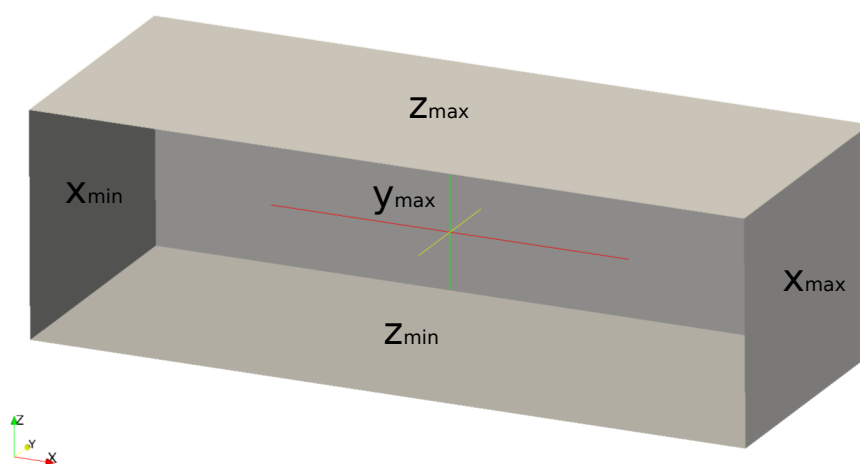
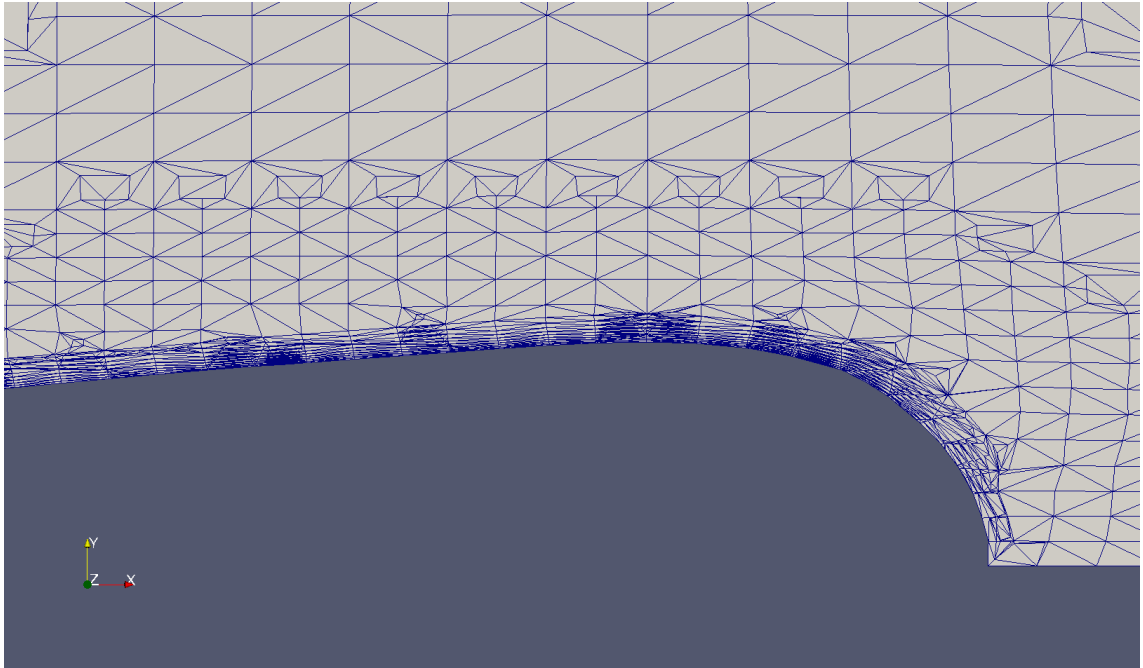
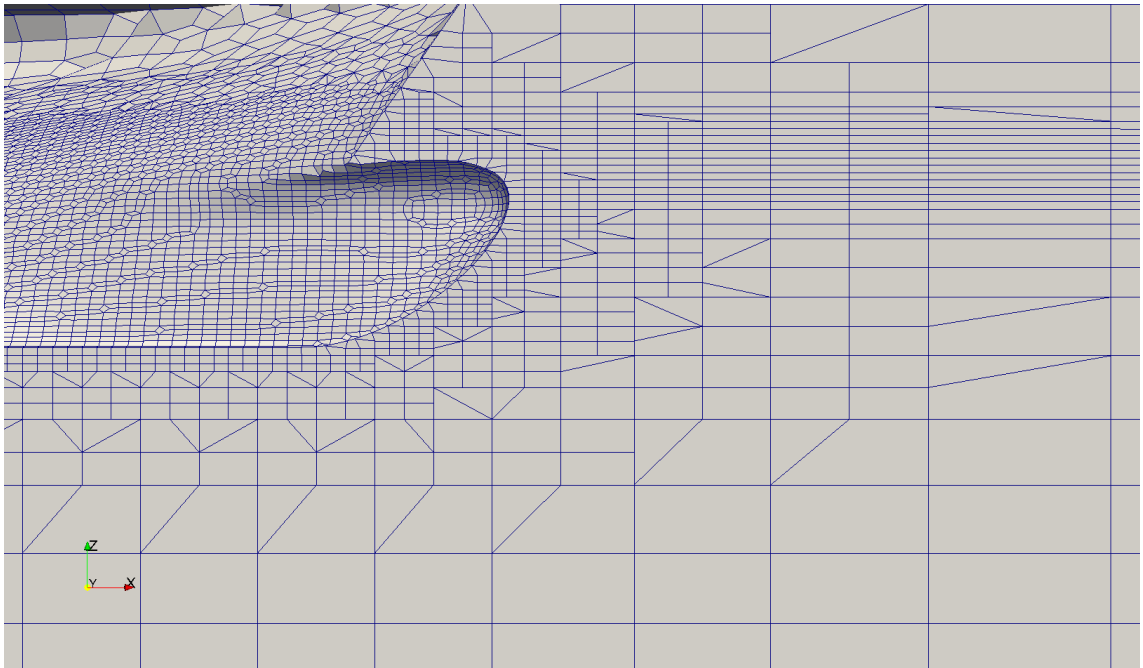


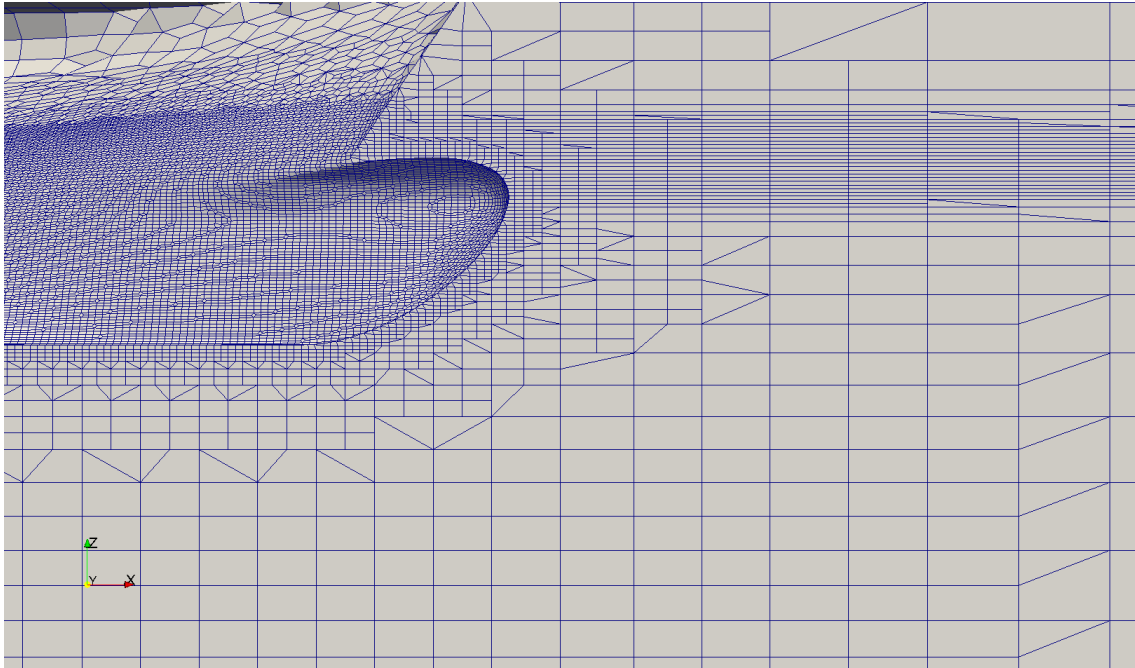
Abbildung A.2: Randbedingungen



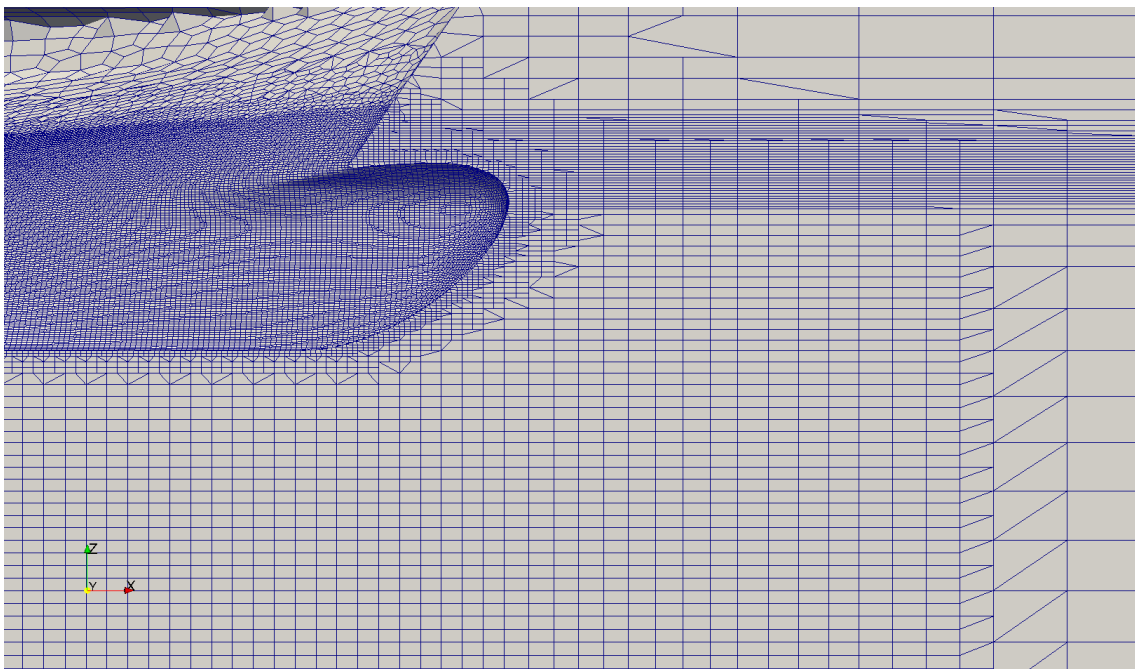
**Abbildung A.3:** *Layer-Schicht* am Bug des Schiffes



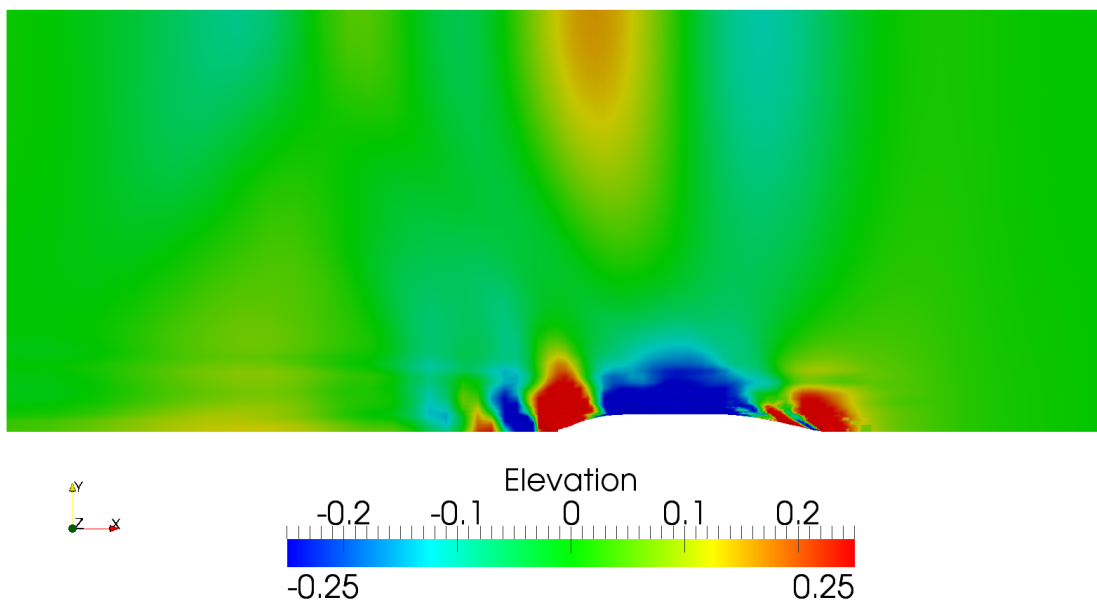
**Abbildung A.4:** Verfeinerung Gitter 1



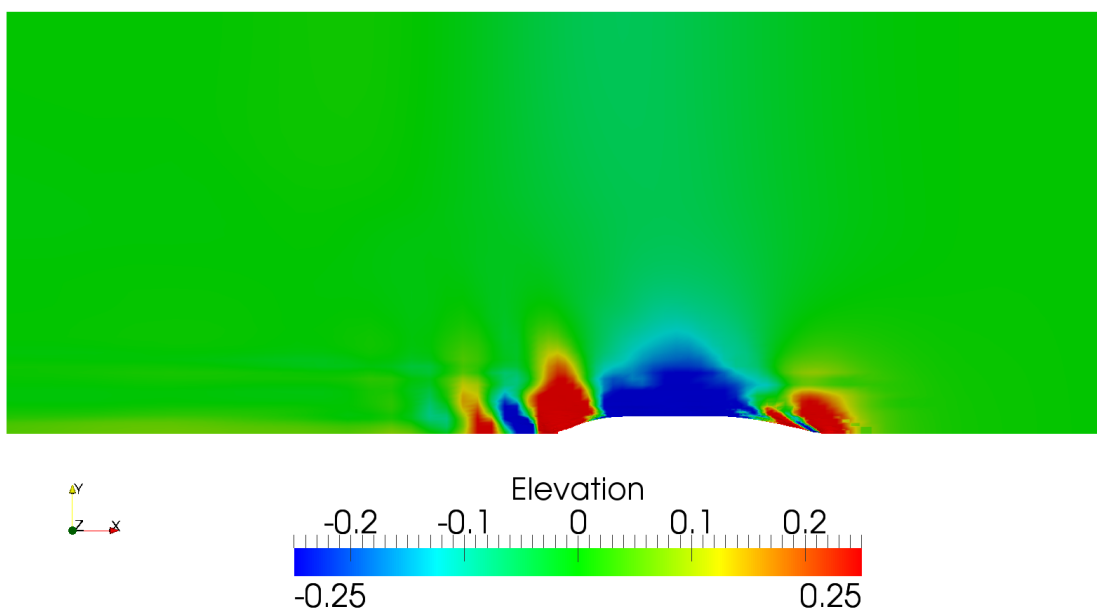
**Abbildung A.5:** Verfeinerung Gitter 2



**Abbildung A.6:** Verfeinerung Gitter 3

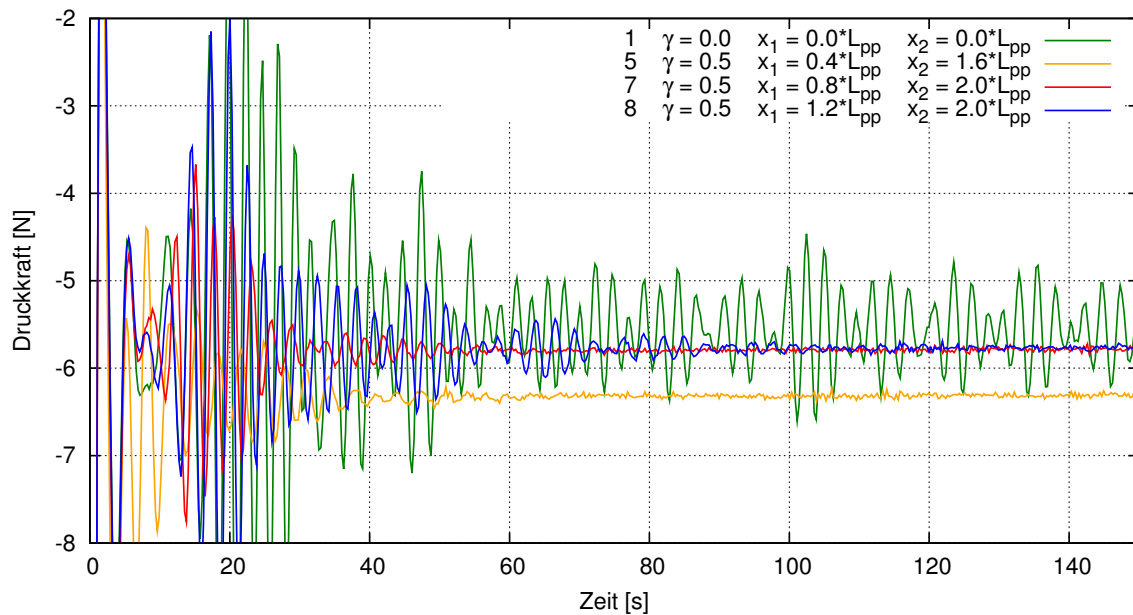


**Abbildung A.7:** Erhebung der freien Oberfläche bei  $24.90 kn$ , FS und den 1. Wellendämpfungsparametern (gemäß Tabelle 4.1)

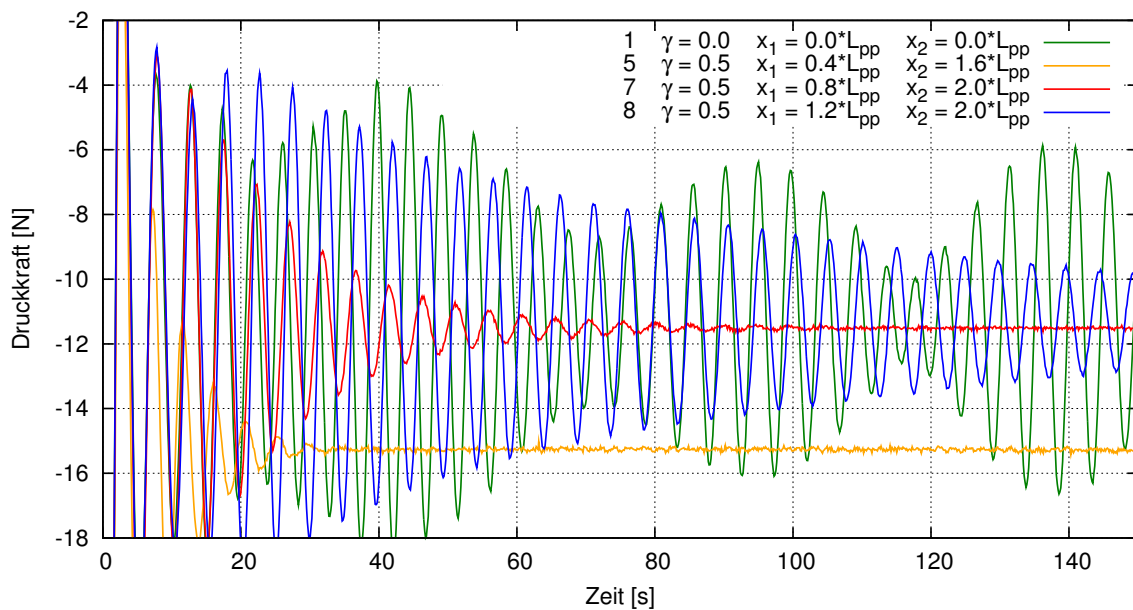


**Abbildung A.8:** Erhebung der freien Oberfläche bei  $24.90 kn$ , FS und den 7. Wellendämpfungsparametern (gemäß Tabelle 4.1)

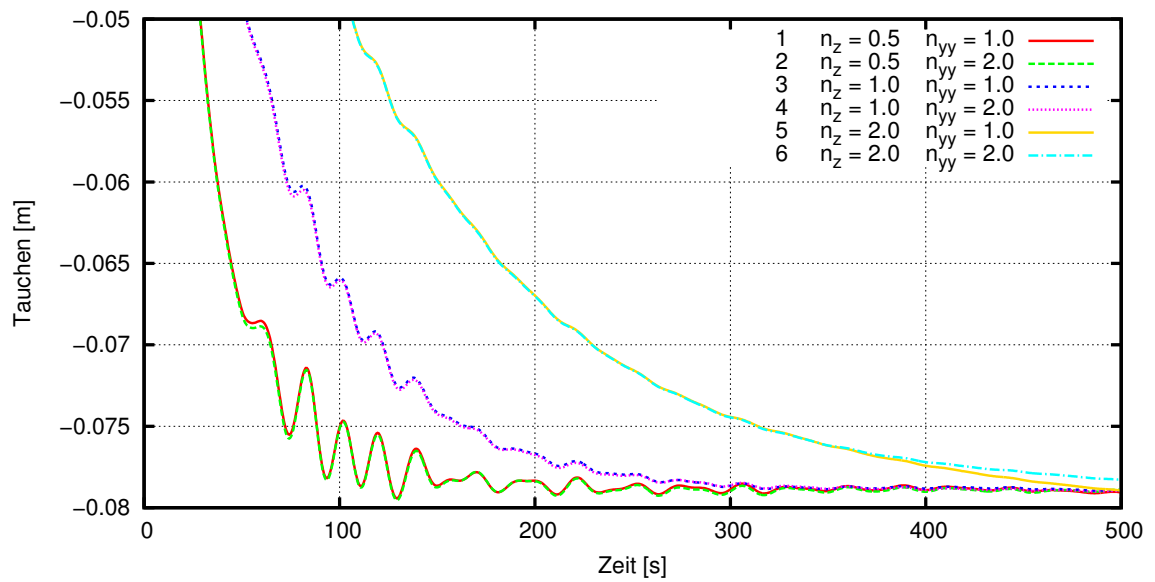




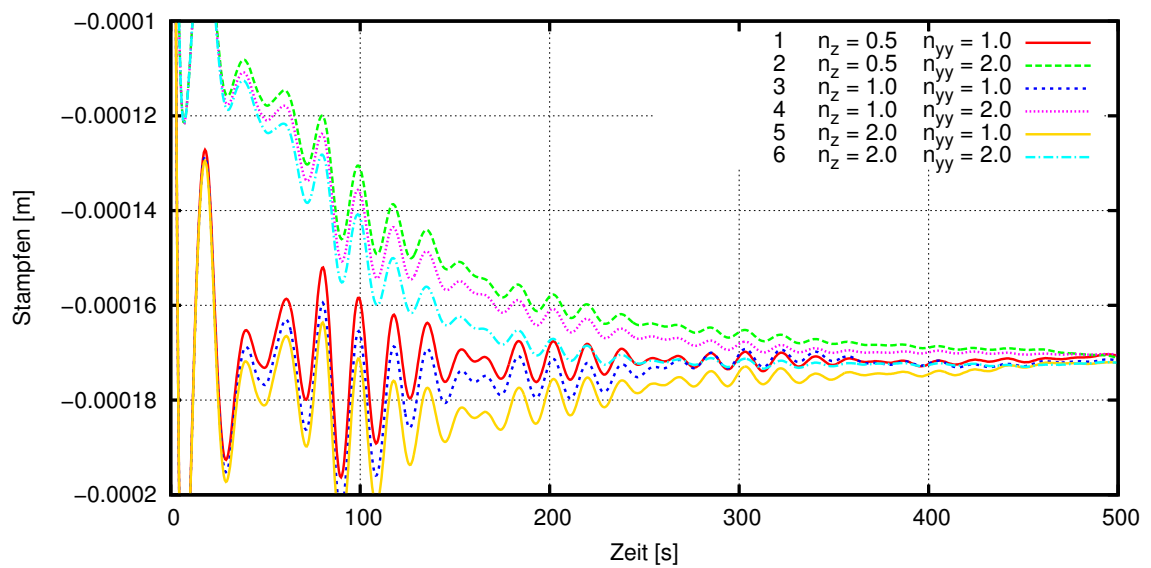
**Abbildung A.9:** Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen bei 12.45 *kn* und MS



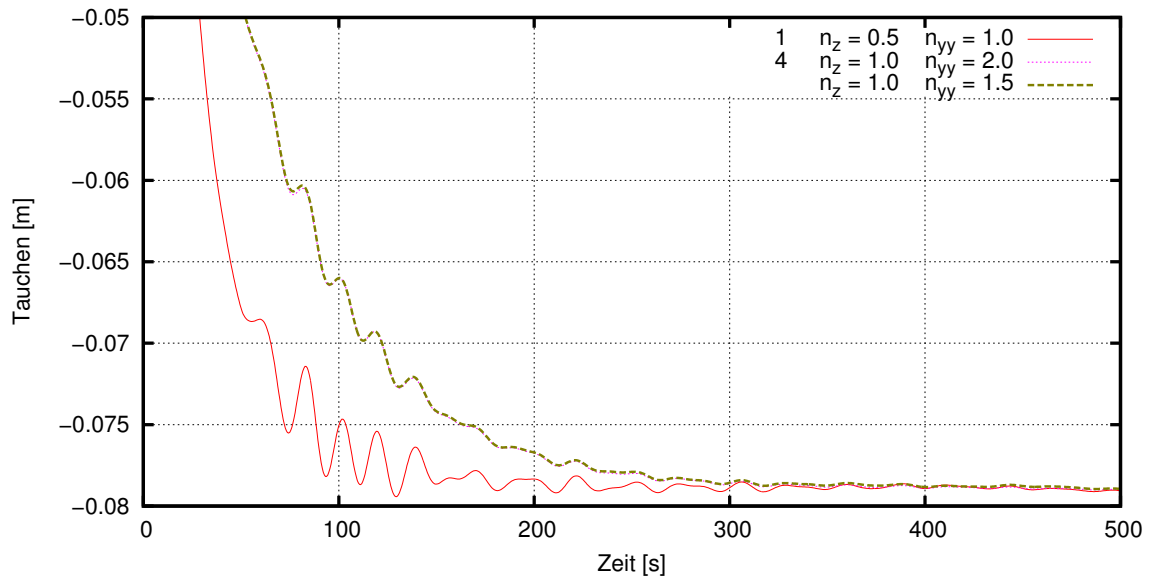
**Abbildung A.10:** Gegenüberstellung verschiedener Wellendämpfungen bei 24.90 *kn* und MS



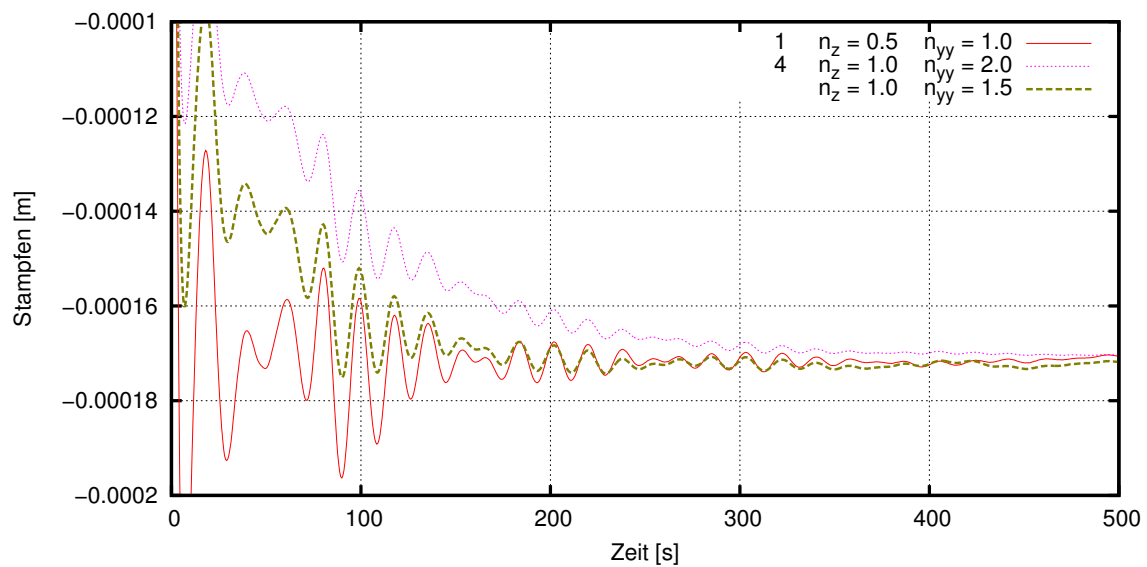
**Abbildung A.11:** Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 kn und FS



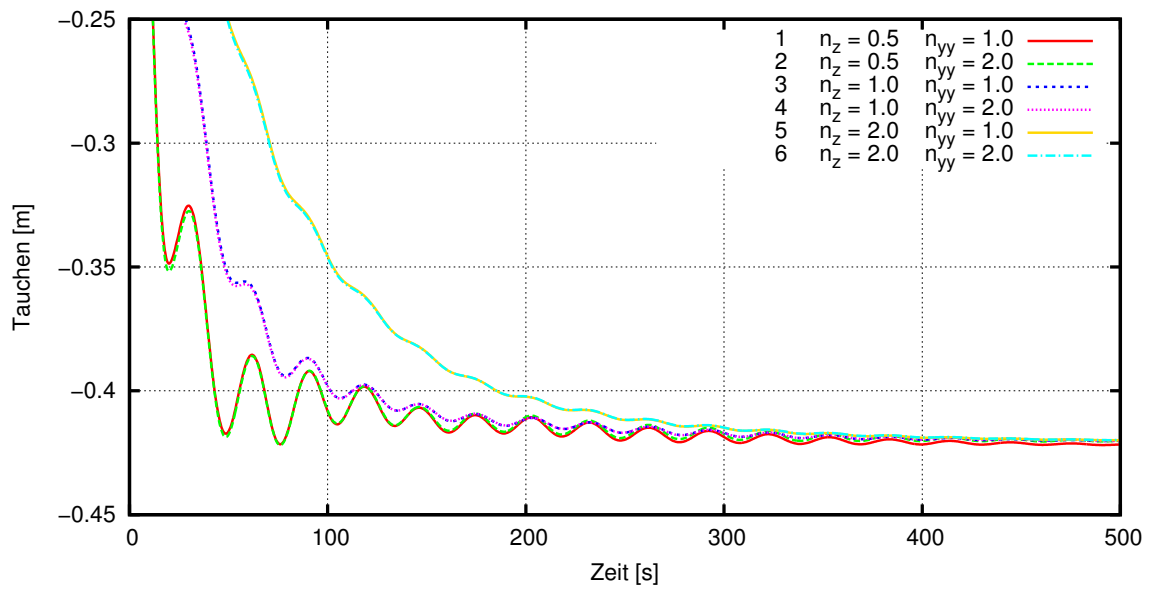
**Abbildung A.12:** Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 kn und FS



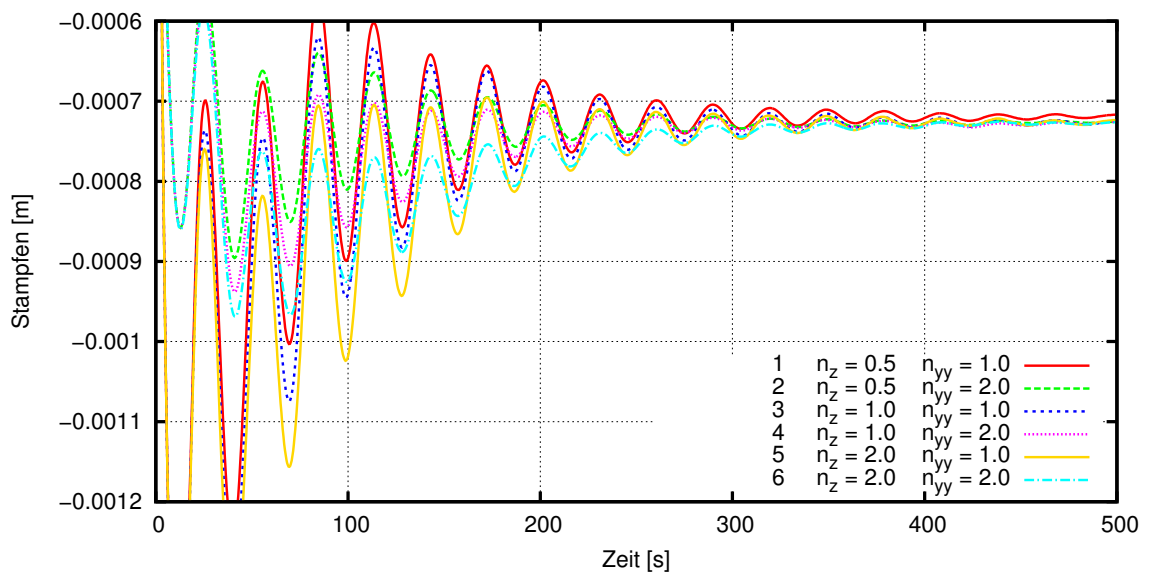
**Abbildung A.13:** Optimierte Tauchbewegung bei 12.45 *kn* und FS



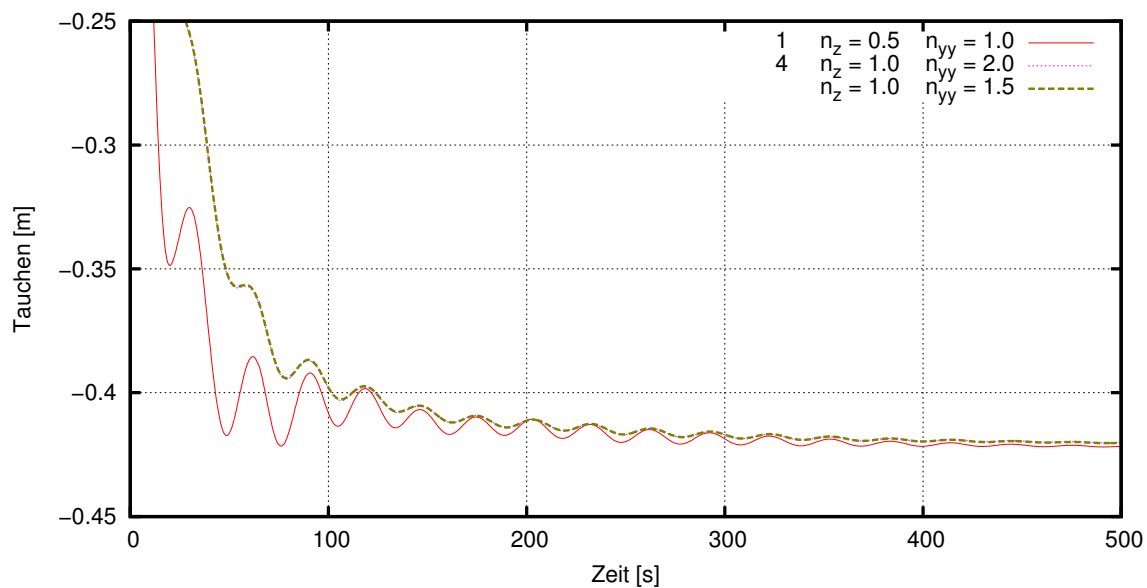
**Abbildung A.14:** Optimierte Stampfbewegung bei 12.45 *kn* und FS



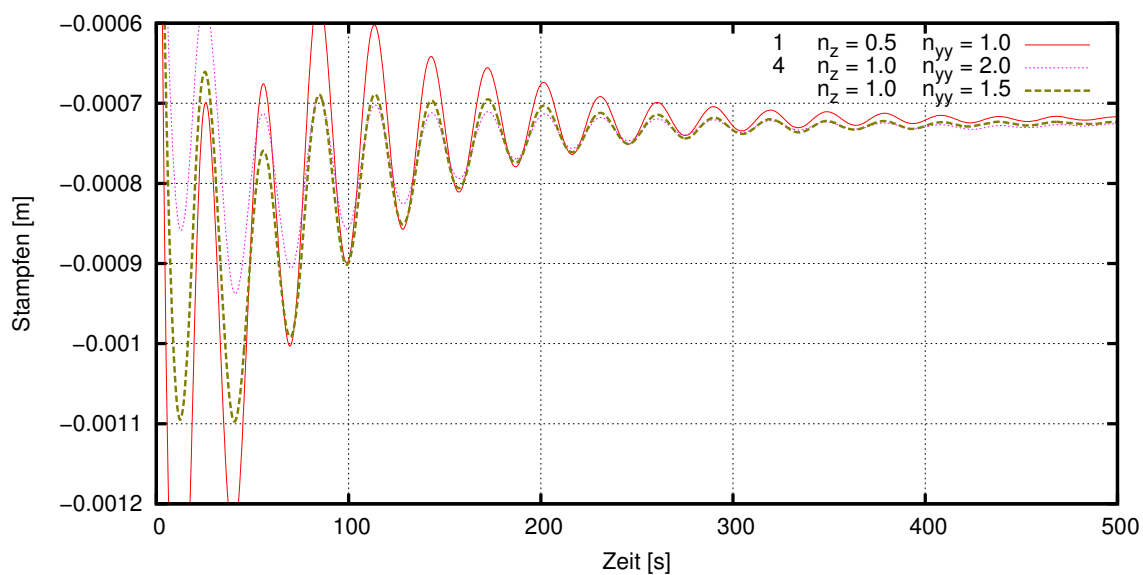
**Abbildung A.15:** Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 kn und FS



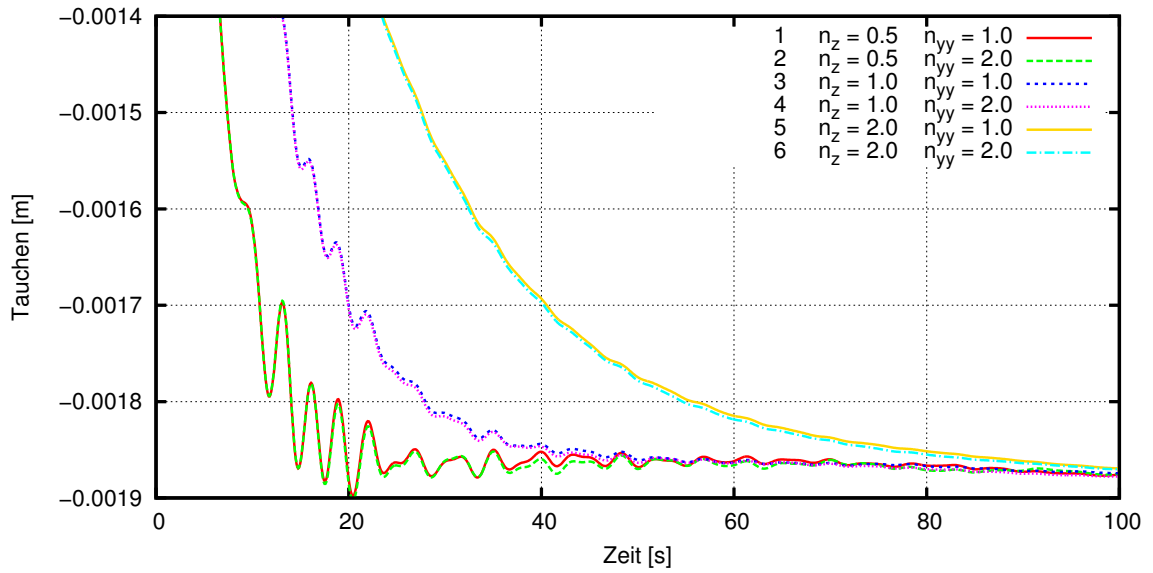
**Abbildung A.16:** Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 kn und FS



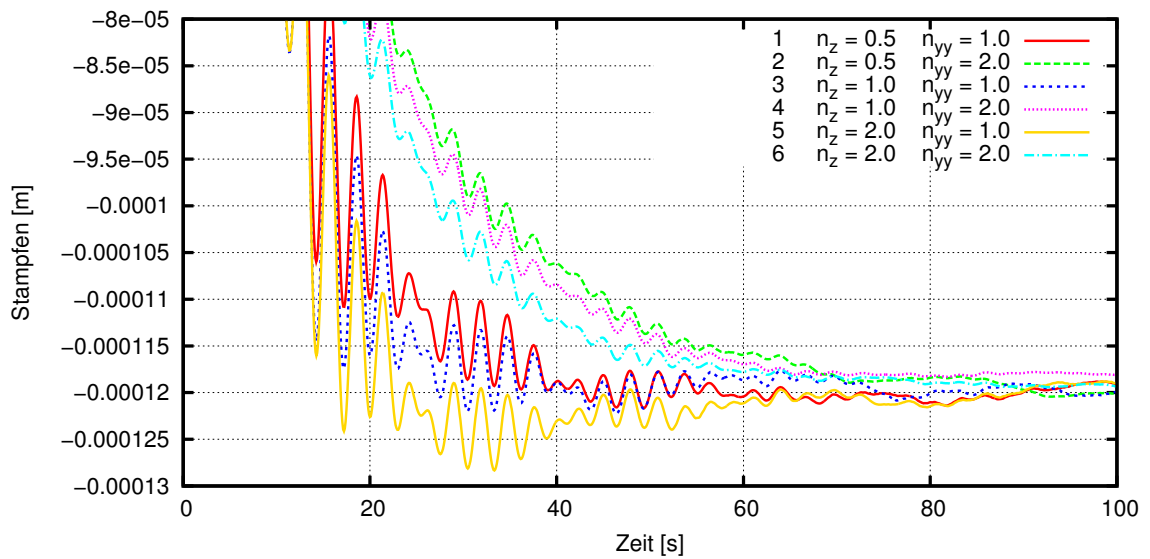
**Abbildung A.17:** Optimierte Tauchbewegung bei 24.90 *kn* und FS



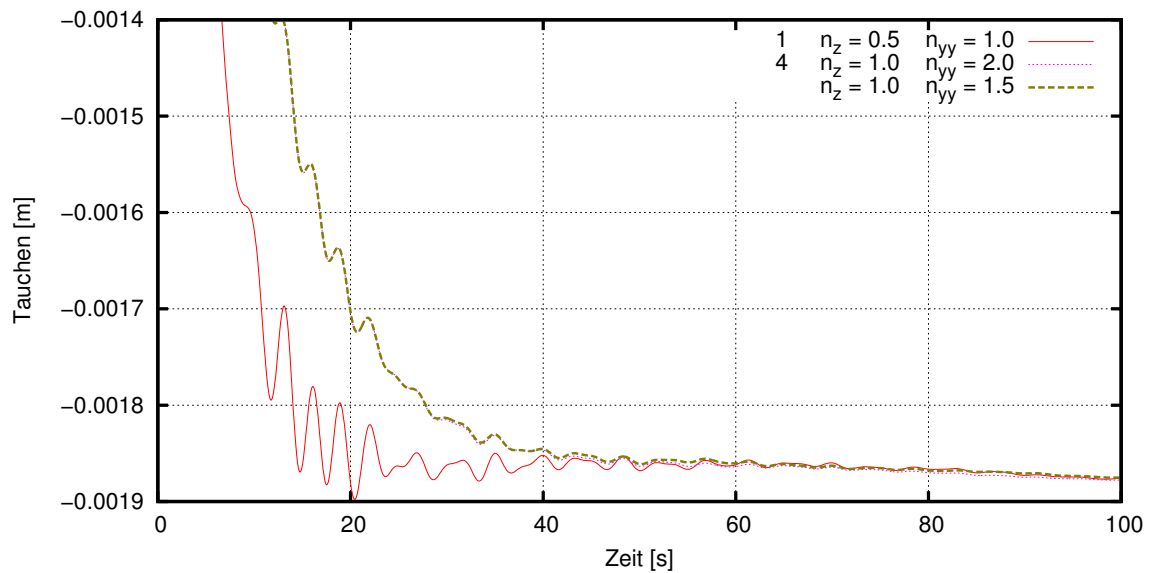
**Abbildung A.18:** Optimierte Stampfbewegung bei 24.90 *kn* und FS



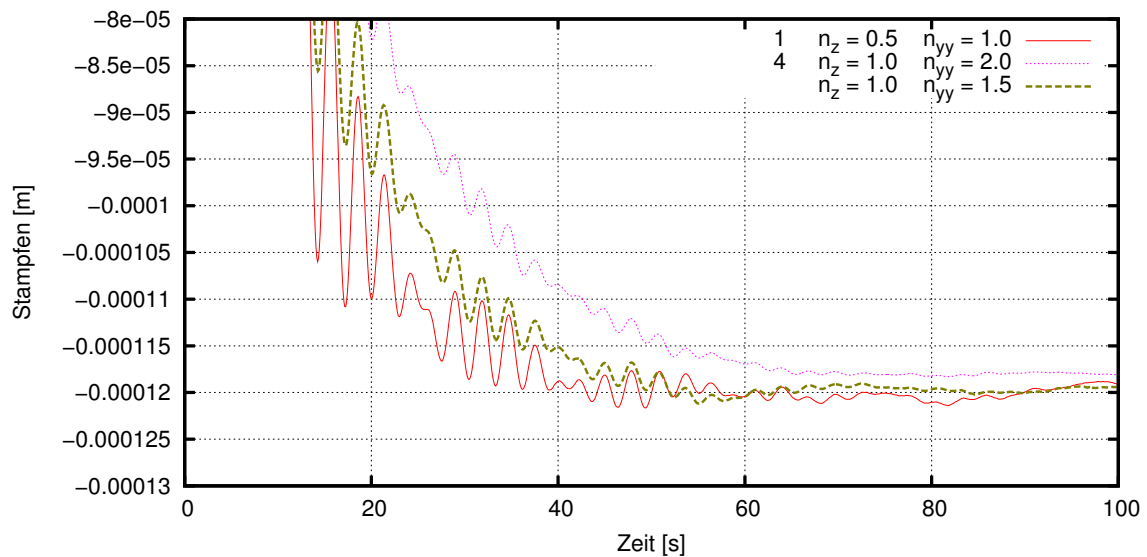
**Abbildung A.19:** Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 *kn* und MS



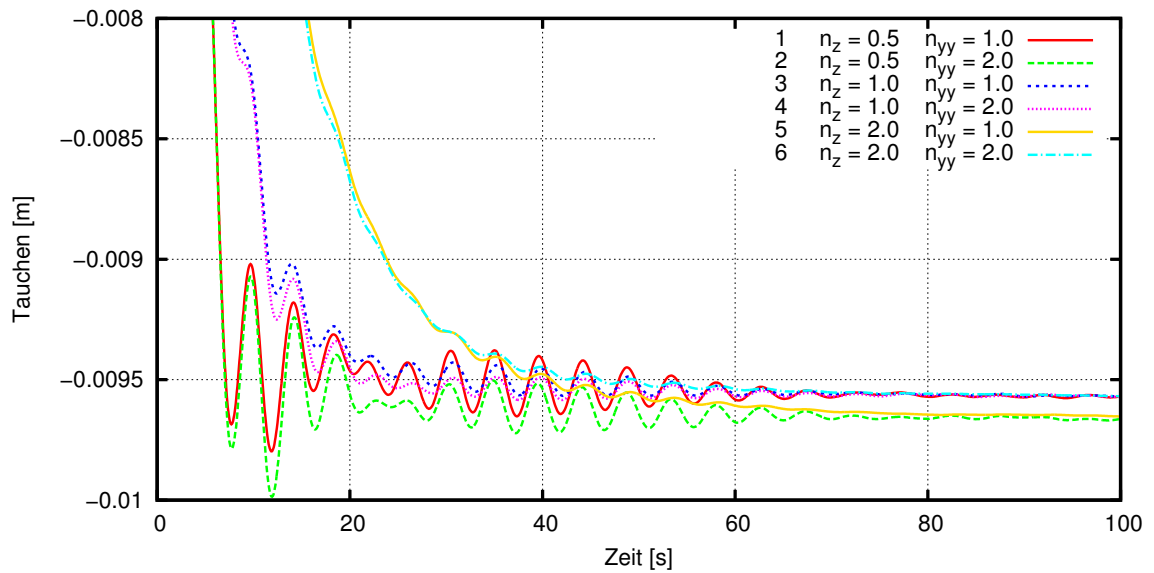
**Abbildung A.20:** Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 12.45 *kn* und MS



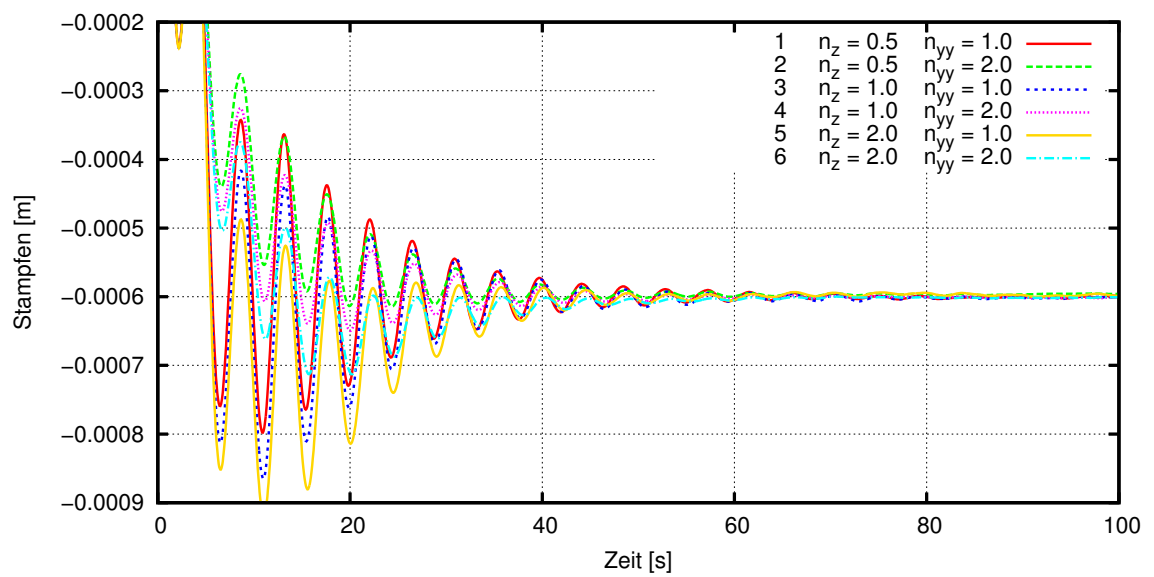
**Abbildung A.21:** Optimierte Tauchbewegung bei 12.45 *kn* und MS



**Abbildung A.22:** Optimierte Stampfbewegung bei 12.45 *kn* und MS

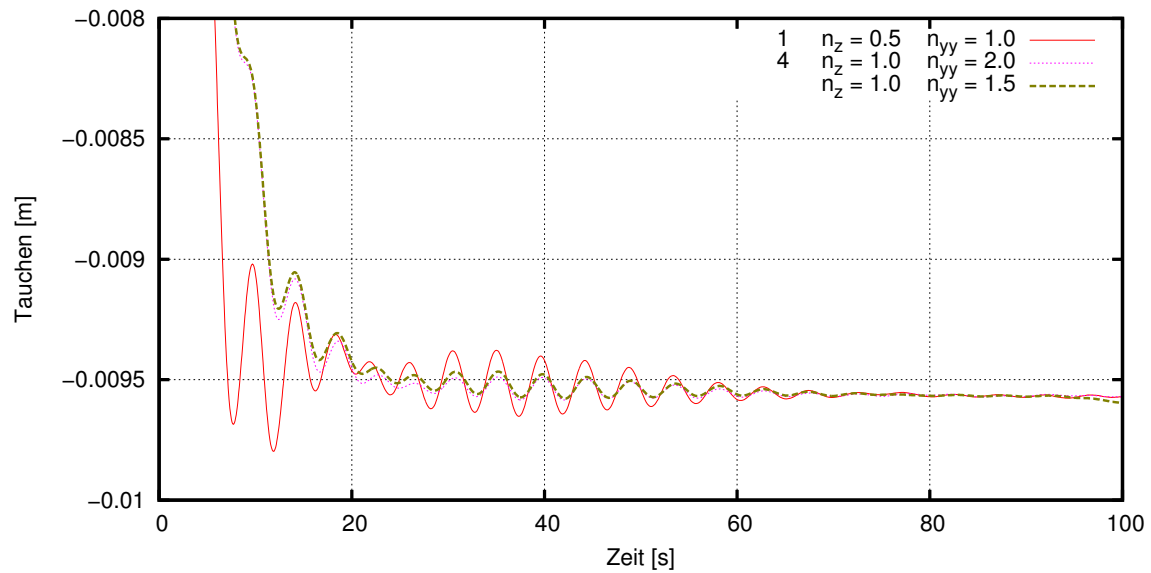


**Abbildung A.23:** Tauchbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 *kn* und MS

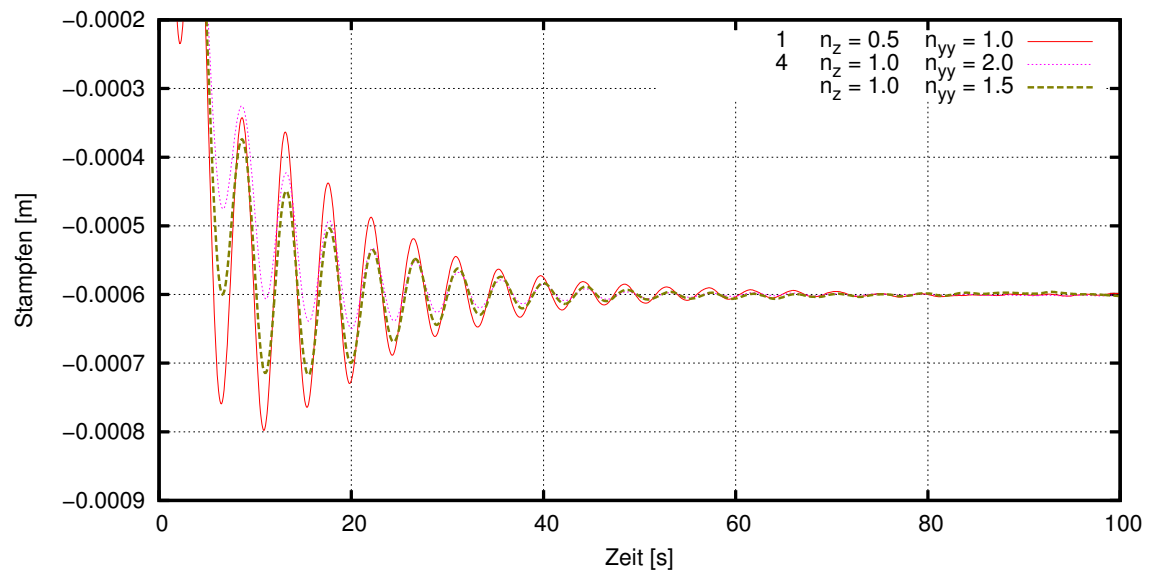


**Abbildung A.24:** Stampfbewegung mit verschiedenen Dämpfungsparametern bei 24.90 *kn* und MS

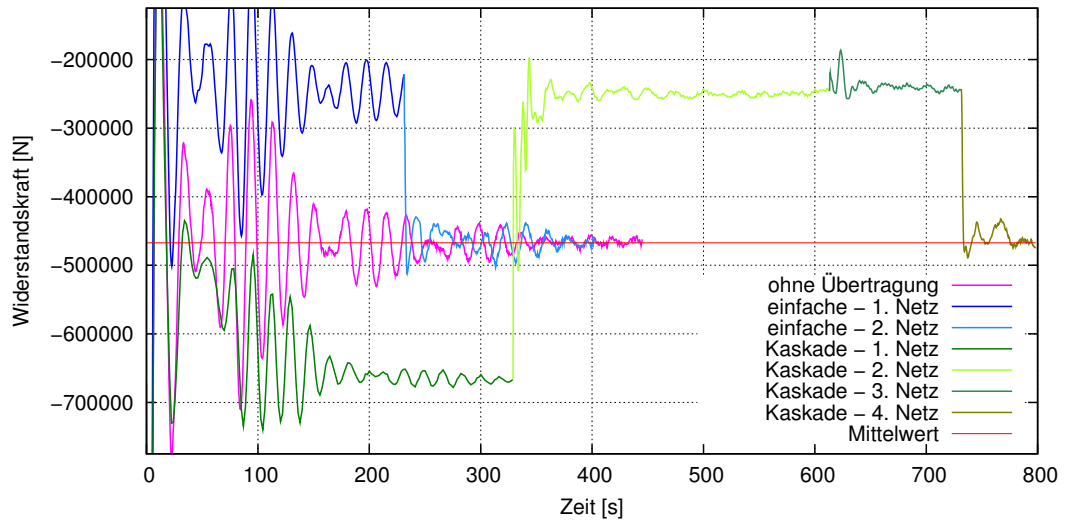




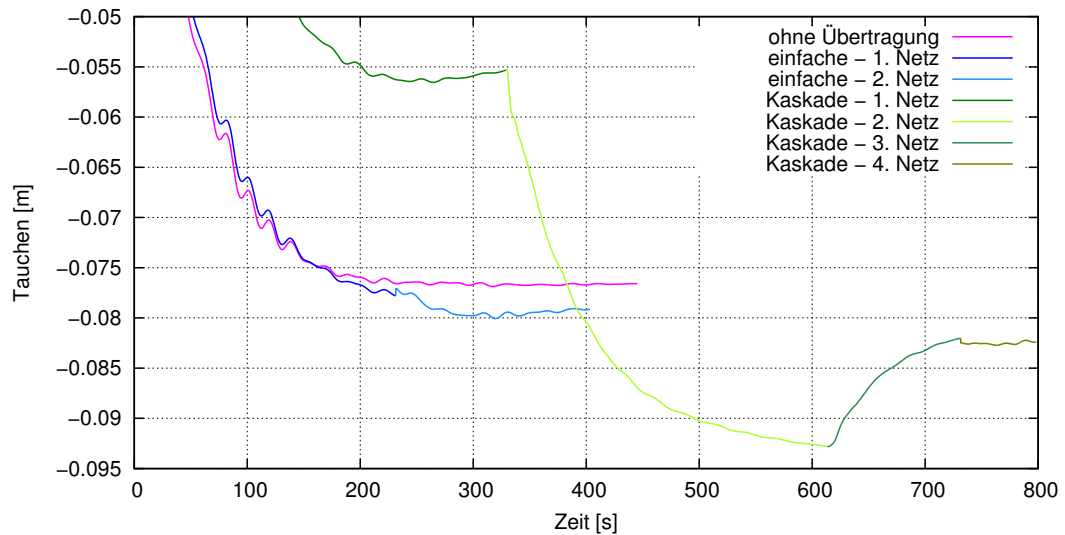
**Abbildung A.25:** Optimierte Tauchbewegung bei 24.90  $kn$  und MS



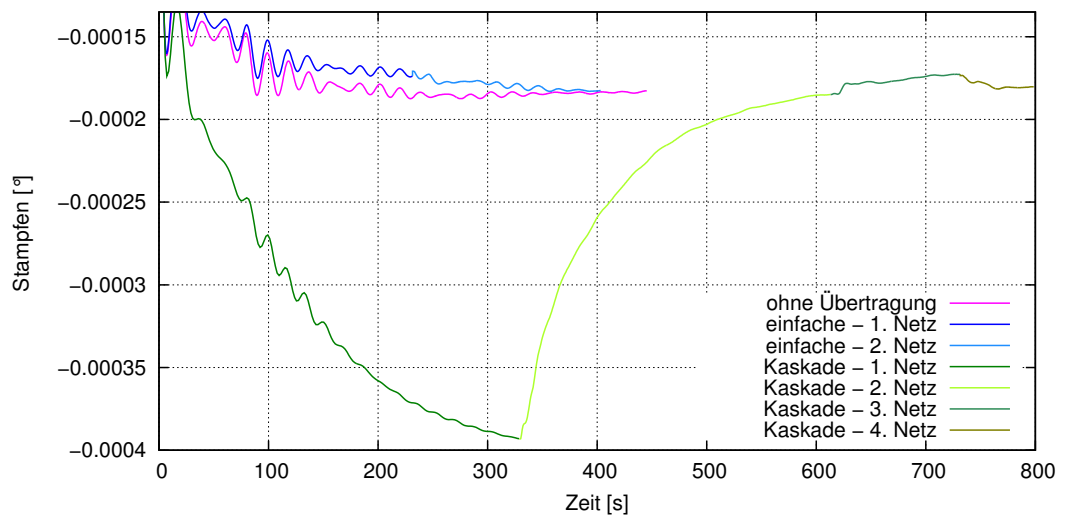
**Abbildung A.26:** Optimierte Stampfbewegung bei 24.90  $kn$  und MS



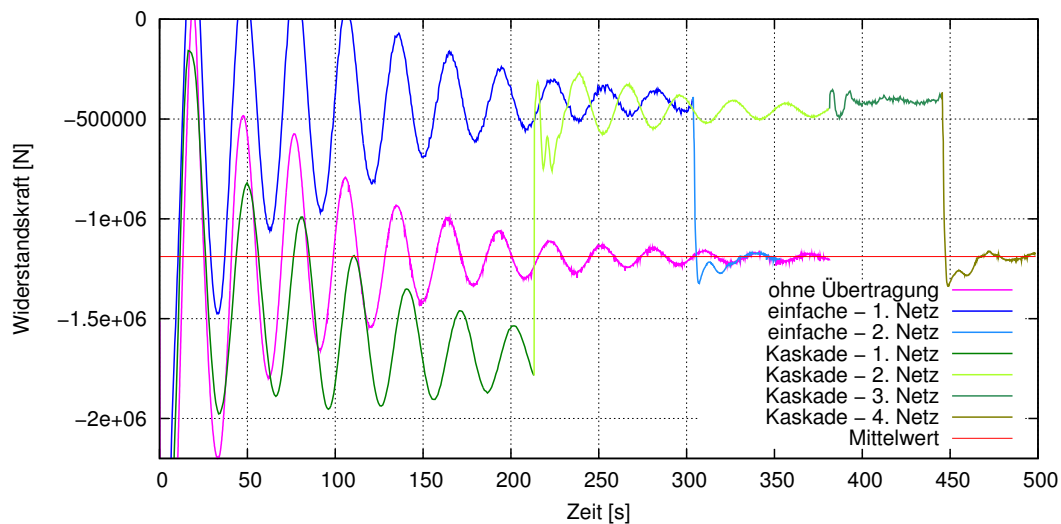
**Abbildung A.27:** Widerstandskraft bei 12.45 *kn* und FS



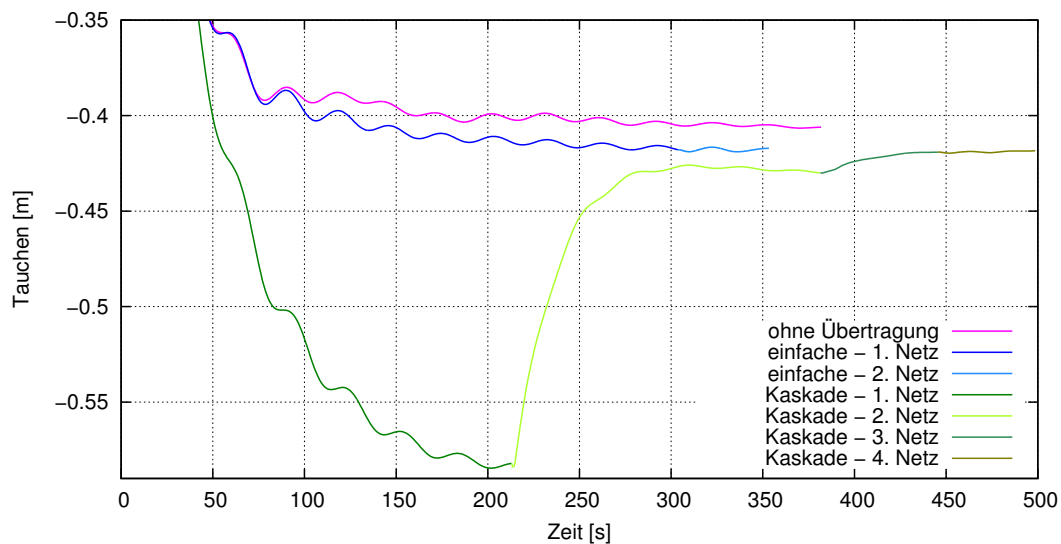
**Abbildung A.28:** Tauchen bei 12.45 *kn* und FS



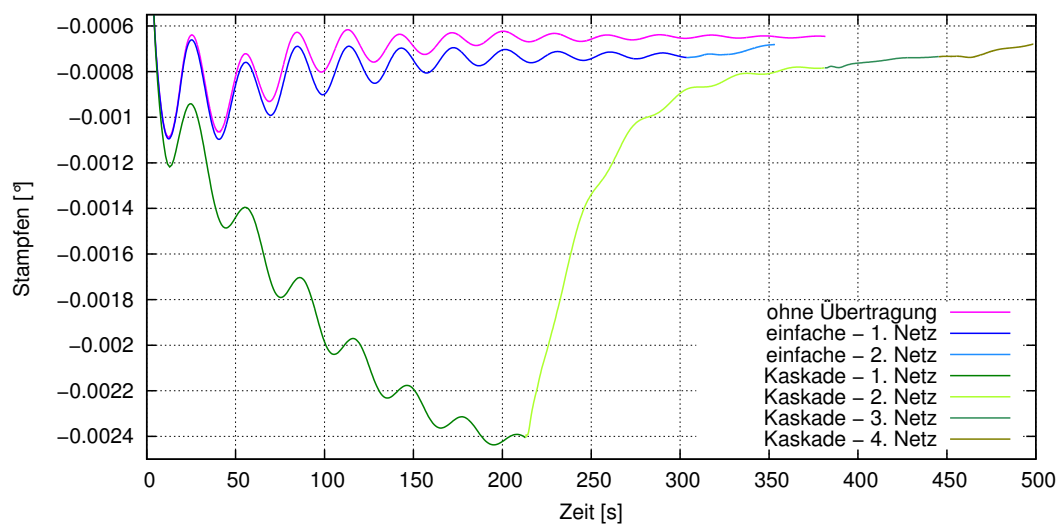
**Abbildung A.29:** Stampfen bei 12.45 *kn* und FS



**Abbildung A.30:** Widerstandskraft bei 24.90 *kn* und FS



**Abbildung A.31:** Tauchen bei 24.90 *kn* und FS



**Abbildung A.32:** Stampfen bei 24.90 *kn* und FS

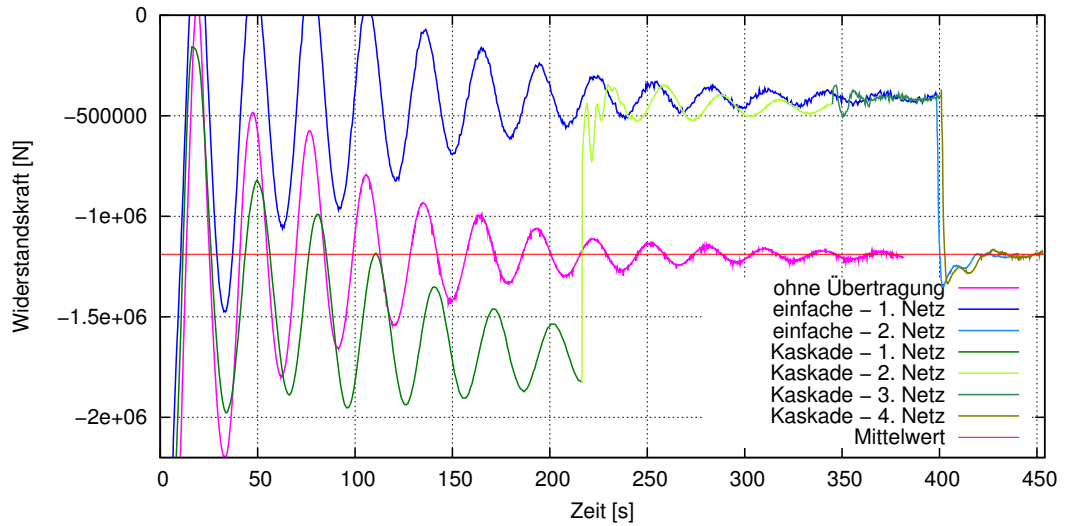


Abbildung A.33: Widerstandskraft bei 24.90 kn und FS nach Optimierung

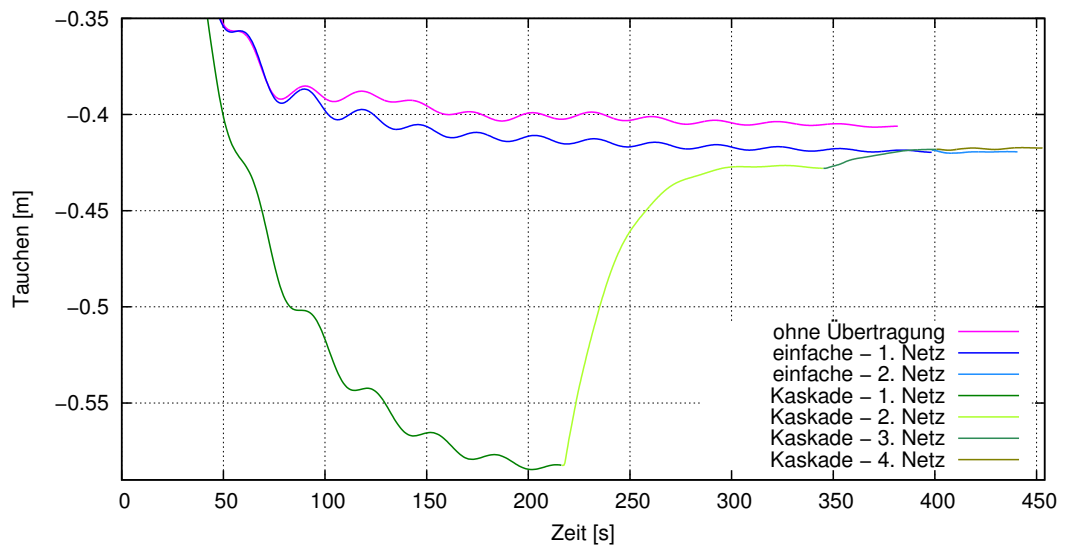


Abbildung A.34: Tauchen bei 24.90 kn und FS nach Optimierung

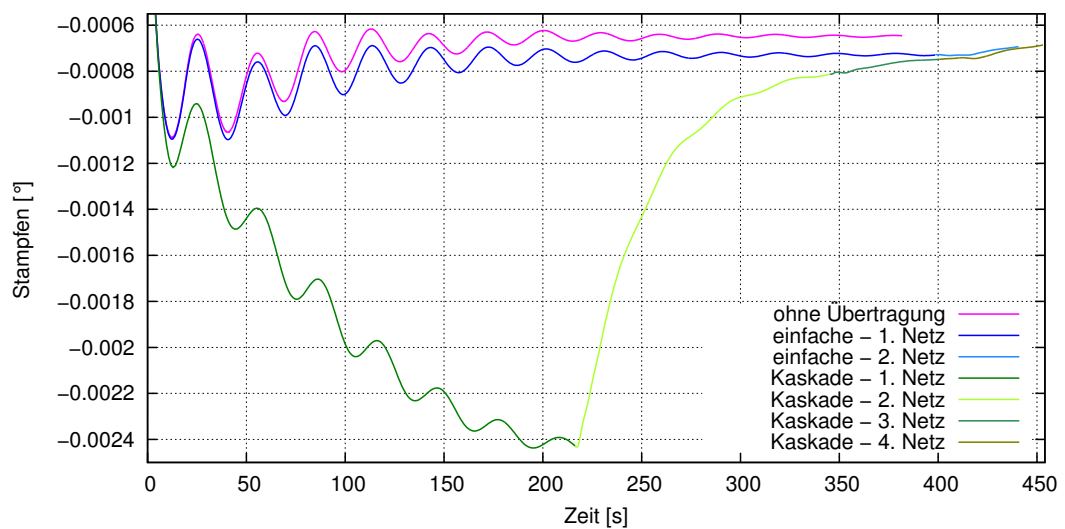
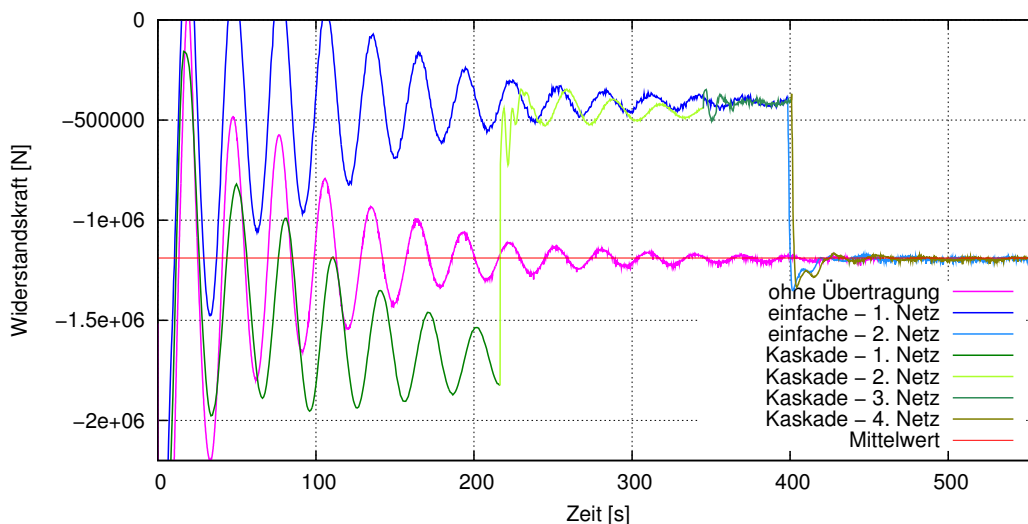
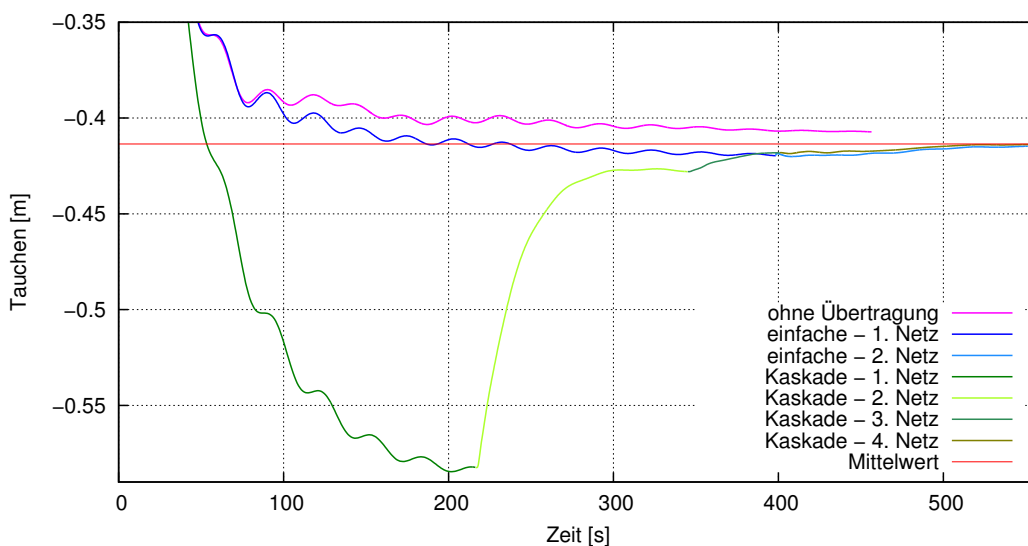


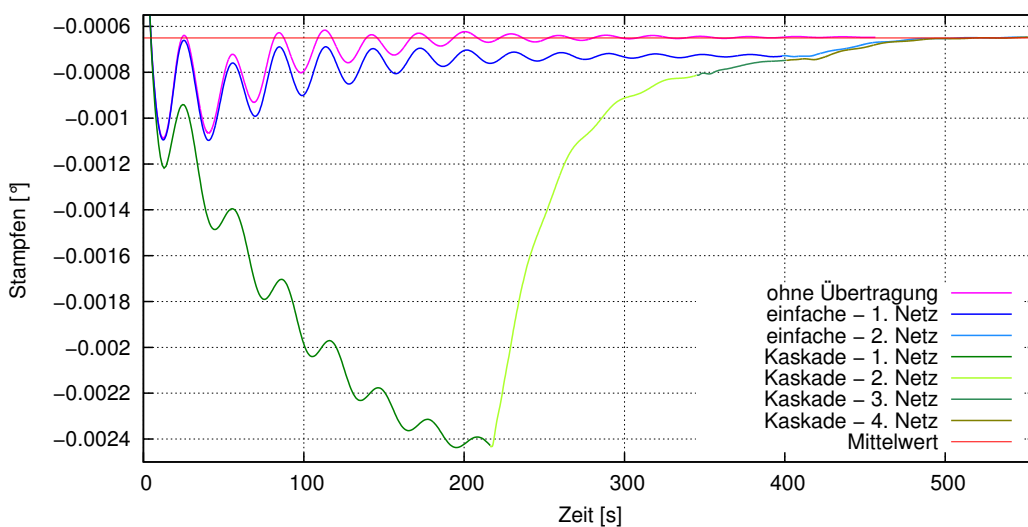
Abbildung A.35: Stampfen bei 24.90 kn und FS nach Optimierung



**Abbildung A.36:** Widerstandskraft bei 24.90 *kn* und FS nach erneuter Optimierung



**Abbildung A.37:** Tauchen bei 24.90 *kn* und FS nach erneuter Optimierung



**Abbildung A.38:** Stampfen bei 24.90 *kn* und FS nach erneuter Optimierung

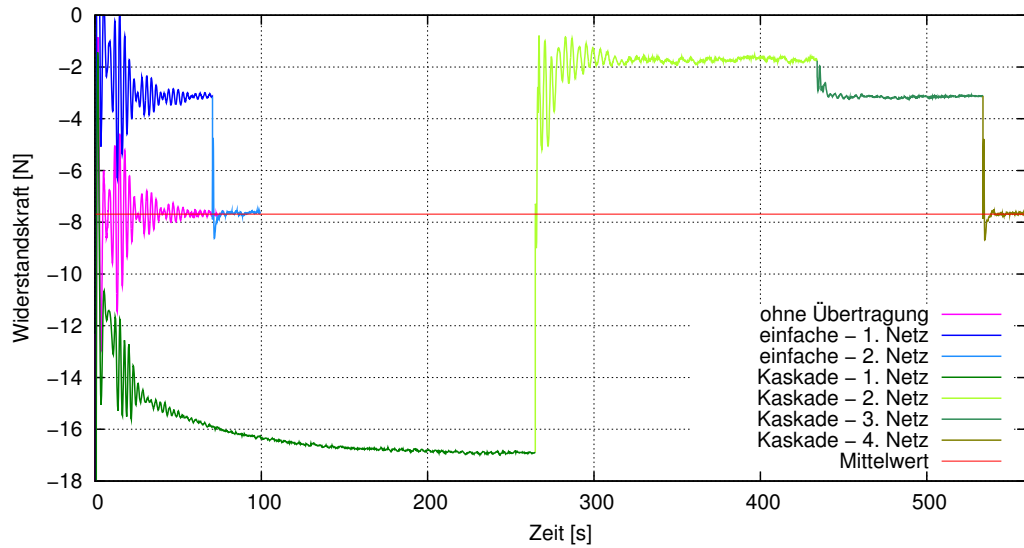


Abbildung A.39: Widerstandskraft bei 12.45 kn und MS

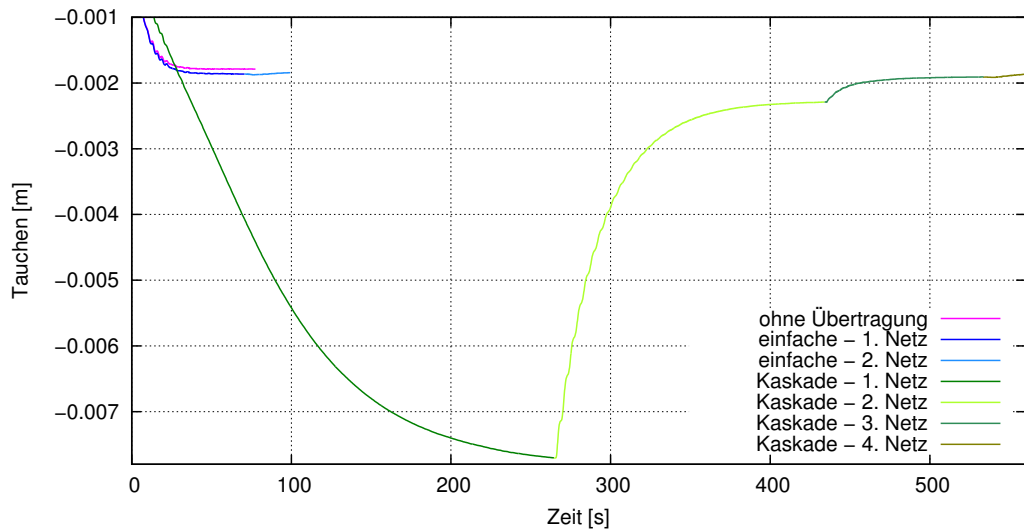


Abbildung A.40: Tauchen bei 12.45 kn und MS

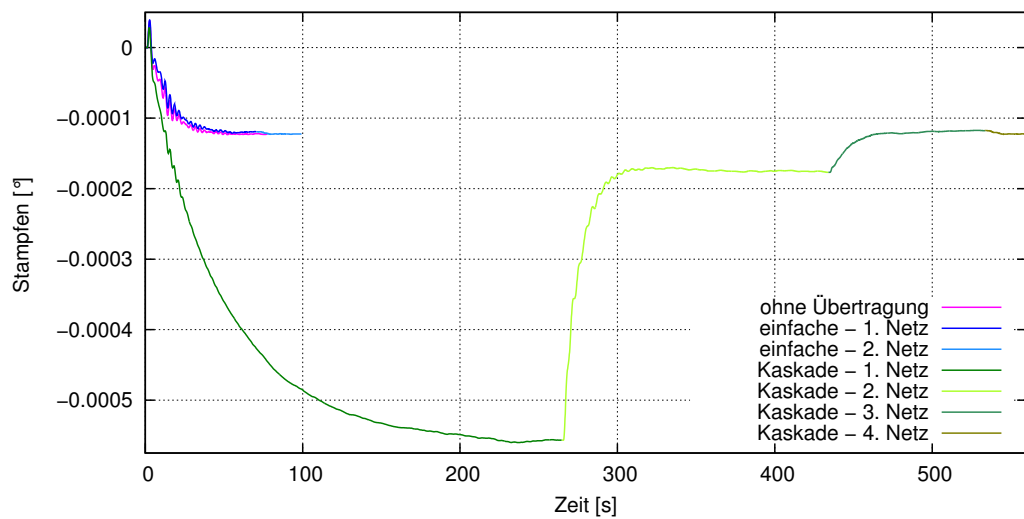


Abbildung A.41: Stampfen bei 12.45 kn und MS

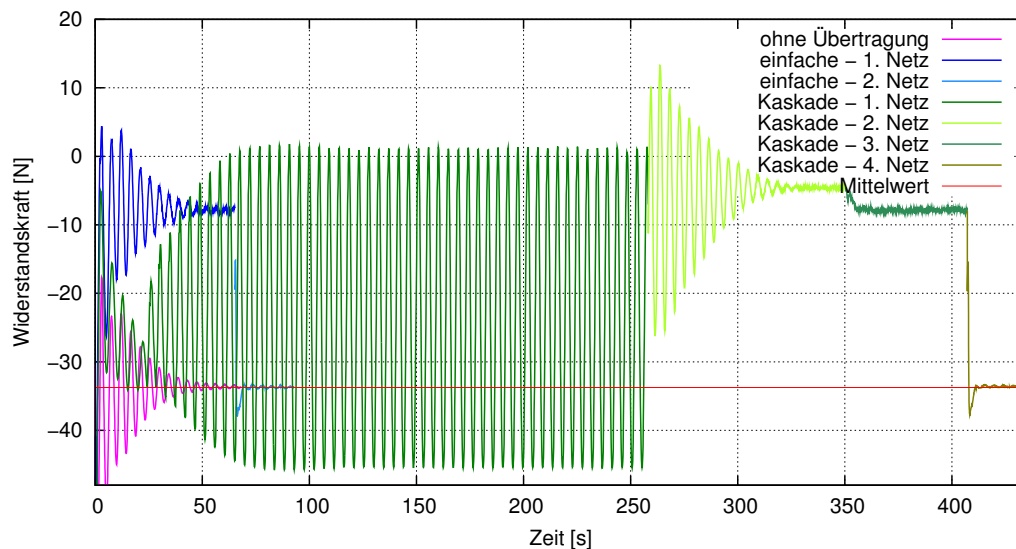


Abbildung A.42: Widerstandskraft bei 24.90 kn und MS

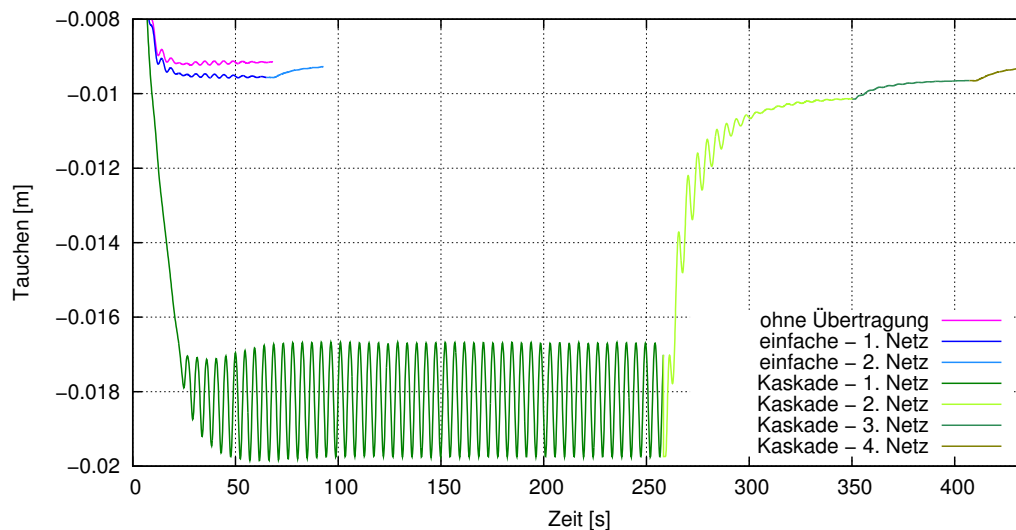


Abbildung A.43: Tauchen bei 24.90 kn und MS

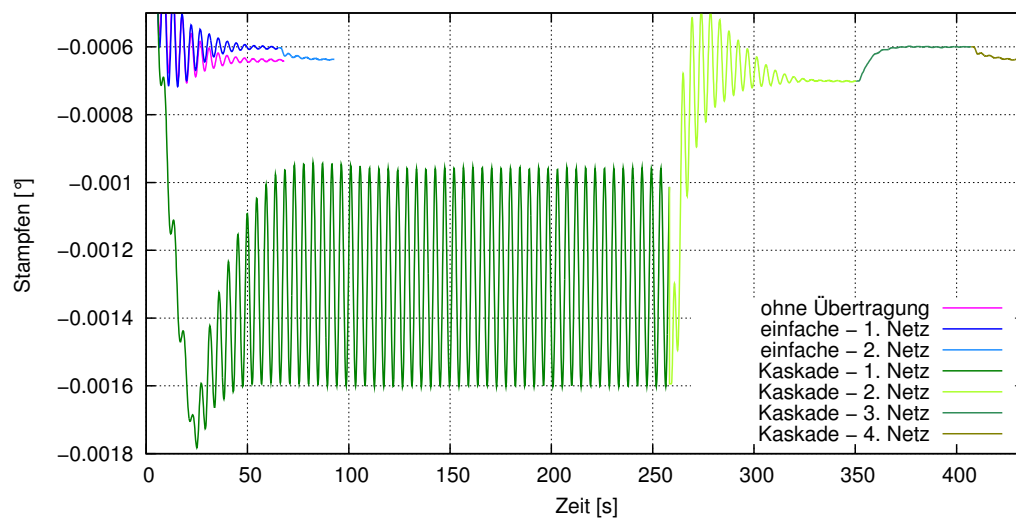


Abbildung A.44: Stampfen bei 24.90 kn und MS





---

# Literaturverzeichnis

- [1] Ferziger, Perić: Numerische Strömungsmechanik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-67586-6.
- [2] Eike Lehmann: Grundzüge des Schiffbaus. Band 1. Technische Universität Hamburg-Harburg.
- [3] Volker Bertram: Practical Ship Hydrodynamics. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000, ISBN 978-0-7506-4851-6 Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0533-1
- [4] Lothar Papula: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Vieweg, 2006, ISBN 978-3-8348-0156-2
- [5] Schäfer: Numerik im Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999, ISBN 3-540-65391-0
- [6] Gross, Hauger, Schröder, Wall: Technische Mechanik, Band 3: Kinetik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-642-11263-8
- [7] Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger: Vorlesungsmanuskript: Glattwasserwiderstand. Stand 2009. Technische Universität Hamburg-Harburg
- [8] H. Schlichting, K. Gersten: Grenzschicht-Theorie. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006, ISBN 978-3-540-23004-5
- [9] Heinz Herwig: Strömungsmechanik - Einführung in die Physik von technischen Strömungen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008, ISBN 978-3-8348-0334-4
- [10] Herbert Oertel jr., Martin Böhle, Thomas Reviol: Strömungsmechanik - Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethode - Softwarebeispiele. Springer-Verlag, 2011, ISBN 978-8348-1397-8



# Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer ausgeführten Bachelorthesis

*Zur Erläuterung des Zwecks dieses Blattes:*

§ 16 Abs. 5 der APSO-TI-BM lautet:

„Zusammen mit der Thesis ist eine schriftliche Erklärung abzugeben, aus der hervorgeht, dass die Arbeit – bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit (§18 Absatz 1) – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Dieses Blatt mit der folgenden Erklärung ist nach Fertigstellung der Arbeit durch jede/n Kandidat/en/in auszufüllen und jeweils mit **Originalunterschrift** (keine Ablichtungen !) **als letztes Blatt des als Prüfungsexemplar der Bachelorthesis gekennzeichneten Exemplars einzubinden.**

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann - auch nachträglich - zur Ungültigkeit der Bachelor-Abschlusses führen.

## Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: **Reichert** Vorname: **Felix**

dass ich die vorliegende Bachelorthesis — bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit — mit dem Thema

Maßnahmen für effizientere RANSE-Simulationen zur Leistungsprognose von Schiffen

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten:

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch ...

---

Ort

Datum

Unterschrift im Original