

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

# **CFD-Berechnungen von Schiffsbewegungen im Seegang mittels Wellenpaketen**

Bachelorthesis

**Martin Bartonitz**

Matr.-Nr.: 1950130

1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Peter Wulf  
2. Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Schmode  
Abgabedatum: 28.02.2012

Martin Bartonitz  
Birkenallee 13  
22147 Hamburg

Tel.: +49 173 3405844  
E-Mail: [martin.bartonitz@haw-hamburg.de](mailto:martin.bartonitz@haw-hamburg.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>X</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Numerische Strömungsmechanik . . . . .	3
2.1.1 Kontinuitätsgleichung . . . . .	3
2.1.2 <i>RANS</i> -Gleichung . . . . .	3
2.1.3 Turbulenzmodellierung . . . . .	5
2.1.4 Mehrphasenströmung . . . . .	5
2.1.5 Druckkorrekturverfahren - <i>SIMPLE</i> . . . . .	5
2.1.6 Druckkorrekturverfahren - <i>PISO</i> . . . . .	7
2.2 Wellengenerierung . . . . .	8
2.2.1 Lineare Wellentheorie nach Airy-Laplace . . . . .	8
2.2.2 Langkämmiger Seegang . . . . .	11
2.3 Schiffsbewegungen . . . . .	12
2.3.1 Koordinatensysteme . . . . .	12
2.3.2 Definition der Freiheitsgrade . . . . .	13
2.3.3 Übertragungsfunktion . . . . .	14
2.3.4 Einsatz von Wellenpaketen nach <i>G. F. Clauss</i> . . . . .	15
2.4 Fourier-Reihen . . . . .	16
<b>3 Berechnungsfall</b>	<b>19</b>
3.1 Schiffs- und Stoffdaten . . . . .	19
3.2 Wellenparameter . . . . .	22
3.3 Seegangsspektren . . . . .	24
3.4 Variation der Amplitudenverhältnisse . . . . .	25
<b>4 Simulation</b>	<b>27</b>
4.1 Dämpfung einzelner Wellenkomponenten . . . . .	27

---

4.2	Gittergenerierung . . . . .	28
4.2.1	Grundgitter . . . . .	28
4.2.2	Verfeinerung des Grundgitters . . . . .	30
4.2.3	Gitterübersicht . . . . .	30
4.2.4	Gitter für Simulationen mit Wellenspektren . . . . .	30
4.3	Simulationsparameter . . . . .	32
4.3.1	Randbedingung . . . . .	32
4.3.2	Zusätzlicher Quellterm: Volumenkraft . . . . .	33
4.3.3	<i>sixDoF</i> -Löser . . . . .	33
4.3.4	Numerische Einstellungen . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>35</b>
5.1	Dämpfung einzelner Wellenkomponenten . . . . .	35
5.2	Untersuchung einer unabhängigen Gitterlösung . . . . .	35
5.3	Einzelwellen . . . . .	38
5.3.1	Zusammenfassung . . . . .	41
5.4	Wellenspektren . . . . .	42
5.4.1	Konstante Amplitude und erstes Amplitudenverhältnis . . . . .	42
5.4.2	Zusammenfassung . . . . .	47
5.4.3	Zweites bis fünftes Amplitudenverhältnis . . . . .	48
5.4.4	Zusammenfassung . . . . .	50
5.5	Einfluss der Volumenkräfte . . . . .	52
5.5.1	Zusammenfassung . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Anhang Tabellen</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Anhang Bilder und Graphen</b>	<b>69</b>
	<b>Literatur</b>	<b>86</b>

---

# Aufgabenstellung

Bestimmung der Übertragungsfunktionen von Schiffsbewegungen mit einem *RANSE* basierten Verfahren. Statt mit Einzelwellen für jede Begegnungsfrequenz wird nur eine Rechnung mit einem Wellenpaket durchgeführt. Mit einer Fourier-Analyse werden dann die Übertragungsfunktionen über die Frequenzen (angenähert) ermittelt. Die Rechnungen werden mit einem neu entwickelten Löser durchgeführt, der auf einer *SIMPLE*-basierten Druck-Geschwindigkeits-Kopplung basiert.

*RANSE*-Löser werden zunehmend zur Beurteilung des Seeverhaltens von Schiffen eingesetzt. Die Vorteile von *RANSE*-Läsern gegenüber traditionellen Berechnungsverfahren im Rahmen der Potentialtheorie sind:

- Bessere Erfassung der freien Oberfläche (inklusive brechender Wellen)
- Bessere Erfassung viskoser Effekte, insbesondere der Rolldämpfung

Dem stehen als Nachteile gegenüber:

- Viel höhere Rechenzeit; dies verhindert bislang häufig den Einsatz für Industrieprojekte. Durch den Einsatz von Wellenpaketen werden Analysen des Seeverhaltens in Modellversuchen (einem Ansatz von Prof. Clauss der TU Berlin folgend [13]) und potential-theoretischen Rechenverfahren im Zeitbereich signifikant beschleunigt
- (Bislang) keine Technik zur Berechnung von Wellen, die das Schiff überholen, bekannt; herkömmliche Randbedingungen (Geschwindigkeit am Einlass, Druck am Auslass) können für diesen Fall nicht angesetzt werden

Im Rahmen der Bachelorthesis sollen nun eine Reihe wichtiger numerischer Parameter bei der Simulation von Schiffen in Wellenpaketen untersucht werden. Hierbei sollen die folgenden Punkte untersucht werden:

- Dämpfung einzelner Wellenkomponenten
- Einfluss der *Body Forces*, die zur Erhaltung der Wellen fern vom Schiff gesetzt werden, auf das Bewegungsverhalten
- Einfluss der Anzahl an Komponenten des Spektrums
- Extraktion der Einzelbewegungen (Kopplung der Freiheitsgrade)

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung des <i>SIMPLE</i> -Algorithmus, nach [5] . . . . .	6
2.2	Schematische Darstellung des <i>PISO</i> -Algorithmus, nach [5] . . . . .	8
2.3	Elementarwelle [7] . . . . .	9
2.4	Definition der Wellenrichtung [14] . . . . .	10
2.5	Langkämmiger Seegang (links), kurzkämmiger Seegang (rechts) [7] . . .	11
2.6	Schiffsfestes Koordinatensystem nach DIN 81 209-1 [8] . . . . .	13
2.7	Freiheitsgrade eines Schiffes [10] . . . . .	14
5.1	Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung . . . . .	41
5.2	Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung . . . . .	41
5.3	Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung mit <i>PISO</i> -Algorithmus . .	44
5.4	Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung mit <i>SIMPLE</i> -Algorithmus .	44
5.5	Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung mit <i>PISO</i> -Algorithmus . .	45
5.6	Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung mit <i>SIMPLE</i> -Algorithmus	45
5.7	Übertragungsfunktionen der Tauchbewegung für vd. Amplitudenverhältnisse . . . . .	50
5.8	Übertragungsfunktionen der Stampfbewegung für vd. Amplitudenverhältnisse . . . . .	50
B.1	Schiffsrumpf . . . . .	69
B.2	Gitter für Wellendämpfung . . . . .	69
B.3	Blocknetz . . . . .	70
B.4	Verfeinertes Blocknetz . . . . .	70
B.5	Randbedingung . . . . .	71
B.6	Gitterbewegung . . . . .	71
B.7	Eingangs-und Ausgangssignal der Dämpfung einer Elementarwelle . . .	72
B.8	Eingangs-und Ausgangssignal der Dämpfung eines Wellenspektrums . . .	72
B.9	Tauchbewegung für die erste Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	73
B.10	Tauchbewegung für die zweite Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	73
B.11	Tauchbewegung für die dritte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	73
B.12	Tauchbewegung für die vierte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	74
B.13	Tauchbewegung für die fünfte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	74
B.14	Tauchbewegung für die sechste Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	74
B.15	Tauchbewegung für die siebte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	75

B.16 Tauchbewegung für die achte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	75
B.17 Stampfbewegung für die erste Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	75
B.18 Stampfbewegung für die zweite Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	76
B.19 Stampfbewegung für die dritte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	76
B.20 Stampfbewegung für die vierte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	76
B.21 Stampfbewegung für die fünfte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	77
B.22 Stampfbewegung für die sechste Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	77
B.23 Stampfbewegung für die siebte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	77
B.24 Stampfbewegung für die achte Elementarwelle mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	78
B.25 Tauchbewegung für die erste Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	78
B.26 Tauchbewegung für die zweite Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	78
B.27 Tauchbewegung für die dritte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	79
B.28 Tauchbewegung für die vierte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	79
B.29 Tauchbewegung für die fünfte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	79
B.30 Tauchbewegung für die sechste Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	80
B.31 Tauchbewegung für die siebte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	80
B.32 Tauchbewegung für die achte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	80
B.33 Stampfbewegung für die erste Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	81
B.34 Stampfbewegung für die zweite Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	81
B.35 Stampfbewegung für die dritte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	81
B.36 Stampfbewegung für die vierte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	82
B.37 Stampfbewegung für die fünfte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	82
B.38 Stampfbewegung für die sechste Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	82
B.39 Stampfbewegung für die siebte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	83
B.40 Stampfbewegung für die achte Elementarwelle mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	83
B.41 Tauchbewegung für Seegangsspektrum mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	83
B.42 Stampfbewegung für Seegangsspektrum mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	84
B.43 Tauchbewegung für Seegangsspektrum mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	84
B.44 Tauchbewegung für Spektrum und $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	84
B.45 Tauch- und Stampfbewegung für Seegangsspektrum mit $A_\zeta/\lambda = 1/350$ . . .	85
B.46 Tauch- und Stampfbewegung für Seegangsspektrum mit $A_\zeta/\lambda = 1/400$ . . .	85

# Tabellenverzeichnis

3.1	Fähre - Geometrie- und Stabilitätsdaten [14] . . . . .	19
3.2	Stoffdaten und physikalische Konstanten . . . . .	21
3.3	Elementarwelle - Experimentelle Wellenparameter [14] . . . . .	22
3.4	Elementarwelle - Wellenamplituden . . . . .	23
3.5	Fähre - Experimentell ermittelte Amplituden [14] . . . . .	23
3.6	Wellenkomponenten des Wellenspektrums mit $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	24
3.7	Wellenkomponenten des Wellenspektrums mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	24
3.8	Übersicht Amplitudenverhältnis . . . . .	25
4.1	Wellenkomponenten des Wellenspektrums . . . . .	28
4.2	Gitterblock Grundmaße . . . . .	29
4.3	Gitterübersicht für Einzelwellen . . . . .	30
4.4	Gitterübersicht für Wellenspektrum . . . . .	31
4.5	Randbedingungen - Übersicht . . . . .	33
4.6	Numerische Einstellungen - Übersicht . . . . .	34
5.1	Differenz der Prozessorzeit in Prozent für das zweite Gitter . . . . .	37
5.2	Einzelwellen - Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung . . . . .	38
5.3	Einzelwellen - Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung . . . . .	39
5.4	Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung . . . . .	43
5.5	Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung . . . . .	43
5.6	Gegenüberstellung der Prozessorzeit für $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	47
5.7	Gegenüberstellung der Prozessorzeit für $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	47
5.8	Gegenüberstellung der Prozessorzeit für vd. Amplitudenverhältnisse . . . . .	49
5.9	Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung mit unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen . . . . .	51
5.10	Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung mit unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen . . . . .	51
5.11	Gegenüberstellung der Prozessorzeit für <i>Body Forces</i> . . . . .	54
5.12	Wellenspektren mit <i>Body Forces</i> für die Tauchbewegung . . . . .	55
5.13	Wellenspektren mit <i>Body Forces</i> für die Stampfbewegung . . . . .	55
A.1	Amplituden der Tauchbewegung für Erregeramplitude $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	59
A.2	Amplituden der Stampfbewegung für Erregeramplitude $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	59
A.3	Amplituden der Tauchbewegung für Erregeramplitude $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	60

A.4	Amplituden der Stampfbewegung für Erregeramplitude $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . .	60
A.5	Gitterauswertung der Tauchbewegung für $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	61
A.6	Gitterauswertung der Tauchbewegung für $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	61
A.7	Gitterauswertung der Stampfbewegung für $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	62
A.8	Gitterauswertung der Stampfbewegung für $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	62
A.9	Gitterauswertung der Prozessorzeit für $A_\zeta = 2.5 m$ . . . . .	63
A.10	Gitterauswertung der Prozessorzeit für $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	63
A.11	Einzelwellen - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur exp. Datenreihe . . . . .	64
A.12	Einzelwellen - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur exp. Datenreihe . . . . .	64
A.13	Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur Einzelwellensimulation . . . . .	65
A.14	Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur Einzelwellensimulation . . . . .	65
A.15	Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur exp. Datenreihe . . . . .	66
A.16	Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur exp. Datenreihe . . . . .	66
A.17	Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur Einzelwellensimulation mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	67
A.18	Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur Einzelwellensimulation mit $A_\zeta/\lambda = 1/200$ . . . . .	67
A.19	Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur exp. Datenreihe . . . . .	68
A.20	Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur exp. Datenreihe . . . . .	68

# Formelzeichen

## Lateinische Buchstaben

$A_\zeta$	$m$	Wellenamplitude
$B$	$m$	Breite des Schiffes
$c$	$m/s$	Ausbreitungsgeschwindigkeit
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$H$	$m$	Wassertiefe
$H(\omega_0)$	–	Übertragungsfunktion des Schiffes
$I_{xx}$	$kg \cdot m^2$	Massenträgheitsmoment um die x-Achse
$I_{yy}$	$kg \cdot m^2$	Massenträgheitsmoment um die y-Achse
$I_{zz}$	$kg \cdot m^2$	Massenträgheitsmoment um die z-Achse
$k$	$1/m$	Wellenzahl
$KG$	$m$	Vertikaler Gewichtsschwerpunkt (engl.: Vertical center of gravity)
$k_{xx}$	$m$	Rollradius um die x-Achse
$k_{yy}$	$m$	Rollradius um die y-Achse
$k_{zz}$	$m$	Rollradius um die z-Achse
$L_{pp}$	$m$	Länge zwischen den Loten (engl.: Length between perpendiculars)
$LCG$	$m$	Horizontaler Gewichtsschwerpunkt (engl. Longitudinal center of gravity)
$LCB$	$m$	Horizontaler Auftriebsschwerpunkt (engl. Longitudinal center of buoyancy)
$m$	$kg$	Masse
$t$	$s$	Zeit
$T$	$m$	Tiefgang des Schiffes
$T_p$	$s$	Periode
$u$	$m/s$	Schiffsgeschwindigkeit
$V$	$m^3$	Verdrängungsvolumen
$x_{COG}$	$m$	x-Koordinate im Körperschwerpunkt
$x'_{COG}$	–	dimensionslose Längsbewegung des Schiffes
$y_{COG}$	$m$	y-Koordinate im Körperschwerpunkt
$y'_{COG}$	–	dimensionslose Schlingerbewegung des Schiffes
$z_{COG}$	$m$	z-Koordinate im Körperschwerpunkt
$z'_{COG}$	–	dimensionslose Tauchbewegung des Schiffes

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	–	Zellfüllgrad
$\eta$	$kg/(m \cdot s)$	dynamische Viskosität
$\vartheta$	$rad/m$	Gierbewegung
$\lambda$	$m$	Wellenlänge
$\mu$	$grad$	Begegnungswinkel
$\nu$	$kg/m^2$	kinematische Viskosität
$\pi$	–	Kreiszahl
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte des Fluides
$\varphi$	$rad$	Phasenverschiebung
$\psi$	$rad$	Stampfwinkel
$\psi'$	$rad$	dimensionsloser Stampfwinkel
$\omega_0$	$rad/s$	Wellenfrequenz
$\omega'_0$	–	dimensionslose Wellenfrequenz



# 1 Einführung

Die auffälligsten Reaktionen eines Schiffes im Seegang sind Schiffsbewegungen. Diese sind zum einen abhängig von den Wellenparametern und zum anderen von den Eigenschaften des Schiffes. Die Ermittlung von Schiffsbewegungen mit Modellversuchen in einem Wellenkanal ist eine besonders zeitaufwändige und kostenintensive Methode. Eine Alternative bieten CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) zur Ermittlung von Schiffsbewegungen, da diese weniger zeitaufwändig und kostenintensiv sind. Um Schiffsbewegungen anhand solcher Simulationen zu untersuchen, stehen zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Einerseits kann die Bewegung eines Schiffes direkt in einer vorgegeben Abfolge von Wellen (z.B. aufgezeichneter Seegang) simuliert werden. Andererseits können, wenn eine allgemeingültige Lösung gesucht ist, Übertragungsfunktionen ermittelt werden, die die Bewegung des Schiffes in Abhängigkeit von der Begegnungsfrequenz beschreibt. Um die Übertragungsfunktion zu ermitteln, gibt es zwei Möglichkeiten. Eine Möglichkeit ist die Berechnung der Schiffsbewegungen, indem Simulationen mit Einzelwellen durchgeführt werden. Für jede Einzelwelle wird der zugehörige Wert der Übertragungsfunktion bestimmt. Dies kann jedoch einen hohen Zeit- und Ressourcenaufwand beinhalten, besonders wenn viele Parameter, wie Wellenlänge, Begegnungswinkel und -frequenz variiert werden. Die andere Möglichkeit ist die Simulation anhand eines Seegangsspektrums, das aus vielen Einzelwellen zusammen gesetzt ist. Mit Hilfe einer Fourier-Transformation wird aus dem Ergebnis einer Simulation der gesamte Verlauf der Übertragungsfunktion ermittelt.

Der zeitliche und ressourcenspezifische Aufwand sollte mit der Einführung des Seegangsspektrums deutlich sinken, jedoch sollte die Qualität des Ergebnisses dadurch nicht beeinflusst werden. In dieser Bachelorthesis wird untersucht, ob mit Hilfe des Seegangsspektrums der zeitliche Aufwand verringert und eine vergleichbare Qualität der Ergebnisse gewährleistet werden kann. Die Simulationen sind mit der Open-Source-Software *OpenFOAM* Version 1.6 berechnet worden. Dabei sollen die Simulationen mit Einzelwellen und die Simulationen mit Wellenspektren gegenübergestellt und verglichen werden.

Die Software *OpenFOAM* ist eine Programmbibliothek, die unterschiedliche Löser bereitstellt. Für die Simulationen dieser Bachelorthesis sind *RANS*-Löser (**R**eynolds **A**veraged **N**avier **S**tokes **E**quation) verwendet worden. Um zur Lösung der *RANS*-Gleichung eine Kopplung des Druckfeldes mit dem

Geschwindigkeitsfeld herzustellen, liegen verschiedene Möglichkeiten vor. Die Simulationen der Schiffsbewegungen werden mit zwei verschiedenen Druck-Geschwindigkeits-Kopplungen berechnet. Dabei basiert eine Druck-Geschwindigkeits-Kopplung auf dem *PISO*-Algorithmus (**P**ressure **I**mplizit with **S**plitting of **O**perations), der bereits als Löser für Mehrphasenströmungen in *OpenFOAM* implementiert ist, und die andere auf dem *SIMPLE*-Algorithmus (**S**emi-**I**mplizit **M**ethod for **P**ressure-**L**inked **E**quations), der von FutureShip neu in *OpenFOAM* implementiert worden ist. Im Rahmen dieser Thesis sollen alle Simulationen mit beiden Algorithmen vollzogen werden, um zu überprüfen, ob eine signifikante Verbesserung der Simulationen erzielt werden kann. Zu diesen Verbesserungen zählen die Genauigkeit der Ergebnisse und die benötigte Prozessorzeit. Beides sind ausschlaggebende Punkte für die Effektivität eines Lösungsverfahrens.

Bevor ein Schiff von einer Werft gebaut wird, werden Modellversuche im Wellenkanal durchgeführt. Dies dient der Erfassung des Seeverhaltens des Schiffes. Das Seeverhalten ist insofern wichtig, da die Besatzung und die Ladung nicht durch unkontrollierte Bewegungen des Schiffes gefährdet werden dürfen. Die Modellversuche im Wellenkanal sind deshalb so kosten- und zeitintensiv, da zuvor ein Schiffsmodell des späteren Schiffes hergestellt werden muss. Gibt es Modifikationen an den Konstruktionsplänen des Schiffes, muss auch das Modell geändert werden. Im Laufe des Entwicklungsprozesses eines Schiffes kann häufig vorkommen. Im Vergleich dazu kann die Veränderung des Computermodells sehr schnell erfolgen.

Das Ziel der vorliegenden Bachelorthesis ist, den Simulationsprozess zu optimieren und neue Lösungsmethoden zu validieren. Zu dieser Optimierung gehören eine Verringerung der verwendeten Ressourcen und eine Verkürzung der Simulationszeiten.

## 2 Theorie

### 2.1 Numerische Strömungsmechanik

#### 2.1.1 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung, auch Massenerhaltungsgleichung genannt, besagt, dass in einem System die Masse weder erzeugt noch zerstört werden kann. Anders ausgedrückt bedeutet es, dass sich die zeitliche Änderung der Masse in einem Volumenelement aus der Summe der eintretenden Volumenströme minus der Summe der austretenden Volumenströme zusammensetzt. Die Kontinuitätsgleichung kann dann wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0. \quad (2.1)$$

Für ein inkompressibles Fluid lässt sich Gleichung (2.1) vereinfachen, da in diesem Fall die Dichte über die Zeit konstant bleibt:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2.2)$$

#### 2.1.2 RANS-Gleichung

Um die Navier-Stokes zusammenzufassen, kann vereinfacht gesagt werden: die zeitliche Änderung des Impulses innerhalb eines Volumenelements entspricht der Summe der eintretenden Impulsströme minus der Summe der austretenden Impulsströme plus die Summe der wirkenden Oberflächenkräfte der Volumenkräfte. Unter der Berücksichtigung der Annahme, dass es sich um ein inkompressibles Medium handelt kann die Navier-Stokes Gleichung in koordinatenfreier Schreibweise dargestellt werden:

$$\underbrace{\rho \cdot \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v} \right)}_{\text{Konvektion}} = \underbrace{\rho \cdot \vec{g} - \nabla \cdot p}_{\text{Quellterm}} + \underbrace{\nabla \cdot (\eta \cdot \nabla \cdot \vec{v})}_{\text{Diffusionsterm}} \quad (2.3)$$

mit

$$\vec{v} = [u \ v \ w]^T \quad \nabla = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \ \frac{\partial}{\partial y} \ \frac{\partial}{\partial z} \right]^T .$$

Eine analytische Lösung der Navier-Stokes Gleichung ist für Seegangssimulationen nahezu unmöglich. Daher müssen vereinfachte und modifizierte Varianten der Navier-Stokes Gleichung und der Kontinuitätsgleichung vereinfacht werden.

Die Reynolds-Mittelung ist ein weit verbreitetes Verfahren. Werden die Reynoldsen Ansätze in die Kontinuitätsgleichung und in die Navier-Stokes Gleichung eingesetzt, ergeben sich die zeitlich gemittelte Kontinuitätsgleichung (Gleichung (2.4)) und die RANS-Gleichung (Gleichung (2.5)). Die Reynoldsen Ansätze lauten:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' & v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' & p &= \bar{p} + p' . \end{aligned}$$

Die zeitlich gemittelte Kontinuitätsgleichung lautet:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 . \quad (2.4)$$

Die zeitlich gemittelte Navier-Stokes Gleichung in y-Richtung lautet:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= \rho \cdot \bar{g}_y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \\ + \eta \cdot \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) &- \underbrace{\rho \cdot \left( \frac{\partial (\overline{v' \cdot u'})}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{v' \cdot w'})}{\partial z} \right)}_{\text{Reynoldsspannungen}} . \end{aligned} \quad (2.5)$$

Die neu hinzugekommenen Terme wirken wie zusätzliche Spannungen. Sie werden als Reynoldsspannungen bezeichnet. Zu den unbekanntenen Größen  $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$  und  $\bar{p}$  kommen nunmehr sechs unbekannte Spannungen hinzu. Unter Verwendung der Kontinuitätsgleichung und der Navier-Stokes Gleichung (3x) können aber nur insgesamt vier Unbekannte berechnet werden. Die zusätzlichen Spannungen werden mittels Turbulenzmodellen bestimmt.

### 2.1.3 Turbulenzmodellierung

Alle Simulationen sind mit dem  $k - \omega - SST$ -Modell berechnet worden. Dieses Turbulenzmodell soll nicht näher erläutert werden. Aus der Turbulenzmodellierung ergeben sich neue Transportgleichungen, für deren Berechnung unter anderem empirisch ermittelte Konstanten zum Einsatz kommen. Die Konstanten können den angegebenen Quellen entnommen werden.

Für isotherme, inkompressible Simulationen entfällt die Energieerhaltungsgleichung, da sich während der Berechnung die Dichte  $\rho$  und die Temperatur  $T$  nicht ändern.

Einen ausführlichen Überblick über die Herleitung der Kontinuitätsgleichung, der Navier-Stokes Gleichung, der Energieerhaltungsgleichung und der Turbulenzmodellierung geben die im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen [1], [2], [3], [4].

### 2.1.4 Mehrphasenströmung

Die verwendete Technik zur Darstellung einer Mehrphasenströmung ist die *VOF-Methode* (Volume Of Fluid). Bei der *VOF-Methode* wird ein Zellfüllgrad eingeführt, darunter wird der Volumenanteil einer Phase (in dieser Arbeit der Flüssigkeit) in dem Volumenelement verstanden. So steht  $\alpha = 1$  für ein nur mit Phase 1 gefülltes Volumenelement und  $\alpha = 0$  für ein nur mit Phase 2 gefülltes Volumenelement. Bei  $0 < \alpha < 1$  ist eine Grenzfläche vorhanden. Zusätzlich zu der Kontinuitätsgleichung und Navier-Stokes Gleichung muss eine Transportgleichung (Gleichung (2.6)) für die Verteilung von  $\alpha$  gelöst werden:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\alpha \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Dieser Abschnitt wird von Ferziger und Perić [3] genauer erläutert.

### 2.1.5 Druckkorrekturverfahren - *SIMPLE*

Es ist in der numerischen Simulation nicht möglich die Kontinuitäts- und Impulsgleichung gleichzeitig zu lösen. Um dieses Problem zu lösen wird zunächst ein Druck vorgegeben, anschließend werden die Geschwindigkeitskomponenten aus der Impulsgleichung berechnet. Im nächsten Schritt werden mit Hilfe eines Druckkorrekturverfahrens Druck und Geschwindigkeitskomponenten in einem iterativen Verfahren korrigiert. Damit sollen am Ende der Iteration die Kontinuitätsgleichung und Impulsgleichung näherungsweise erfüllt werden.

Ein Druckkorrekturverfahren, das 1972 von Patankar und Spalding entwickelt

worden ist, ist der *SIMPLE*-Algorithmus. Der *SIMPLE*-Algorithmus ist eine implizite Druckkorrektur, der im Folgenden erläutert wird. Zunächst wird ein Druckfeld  $p^*$  geschätzt. Mit Hilfe des abgeschätzten Druckfeldes werden die diskretisierten Impulsgleichungen gelöst und ergeben die Geschwindigkeitskomponenten  $u^*, v^*, w^*$  und  $w^*$ . Die berechneten Geschwindigkeitskomponenten  $u^*, v^*, w^*$  werden die Kontinuitätsgleichung nicht erfüllen, deshalb wird eine Druckkorrektur  $p'$  eingeführt. Der nächste Schritt im *SIMPLE*-Algorithmus ist die Korrektur des Druck- und Geschwindigkeitsfeldes, dies geschieht durch Gleichung (2.7):

$$\begin{aligned} p &= p^* + p' & u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v' & w &= w^* + w' \end{aligned} \quad (2.7)$$

Im nächsten Schritt werden Skalargrößen, wie die Turbulenzenergie, Dissipation, usw. berechnet. Das Druck- und Geschwindigkeitsfeld erfüllen die Kontinuitätsgleichung, aber noch nicht die Impulsgleichung, deshalb werden diese Schritte so oft wiederholt, bis eine Konvergenz erreicht wird. Das Durchlaufen der Druckkorrektursequenz wird als äußere Iteration bezeichnet. Das Lösen der entstandenen Gleichungssysteme (z.B. für Druckkorrektur oder für die skalaren Größen) wird als innere Iteration bezeichnet. Abbildung 2.1 zeigt die schematische Darstellung des *SIMPLE*-Algorithmus.



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung des *SIMPLE*-Algorithmus, nach [5]

## 2.1.6 Druckkorrekturverfahren - *PISO*

Eine Variation des *SIMPLE*-Algorithmus ist der 1986 von Issa eingeführte *PISO*-Algorithmus. Der *PISO*-Algorithmus unterscheidet sich zum *SIMPLE*-Algorithmus durch eine zweite Druckkorrekturgleichung. Die zweite Druckkorrektur soll die Vereinfachungen der ersten Druckkorrektur kompensieren. Dabei verlaufen die ersten drei Schritte exakt wie im *SIMPLE*-Algorithmus. Im vierten Schritt wird eine zweite Druckkorrektur  $p''$  eingeführt und die Geschwindigkeitskorrekturen  $u''$ ,  $v''$  und  $w''$  werden berechnet. Mit den berechneten Korrekturen kann das Druck- und Geschwindigkeitsfeld erneut korrigiert werden (Gleichung (2.8)):

$$\begin{aligned} p &= p^{**} + p'' & u &= u^{**} + u'' \\ v &= v^{**} + v'' & w &= w^{**} + w'' . \end{aligned} \quad (2.8)$$

Im nächsten Schritt werden die Skalargrößen berechnet und das Konvergenzkriterium wird überprüft. Typische Konvergenzkriterien sind in der Literatur nachzulesen. Quelle [1] gibt einen guten Einblick in Konvergenzkriterien und Druckkorrekturverfahren. Ein Vorteil des *PISO*-Algorithmus ist, dass die Anzahl der äußeren Iterationen abnimmt, im Gegenzug wird der Aufwand für jede äußerer Iteration größer, da mehrere Druckkorrekturen gelöst werden müssen. Abbildung 2.2 zeigt die schematische Darstellung des *PISO*-Algorithmus. Dieser Abschnitt wird von Ferziger und Perić [3], Laurien und Oertel [1] und Schäfer [5] genauer erläutert.

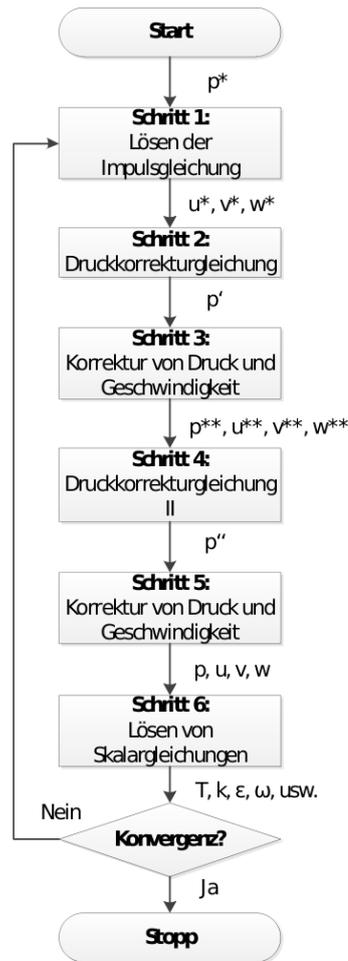


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des *PISO*-Algorithmus, nach [5]

## 2.2 Wellengenerierung

### 2.2.1 Lineare Wellentheorie nach Airy-Laplace

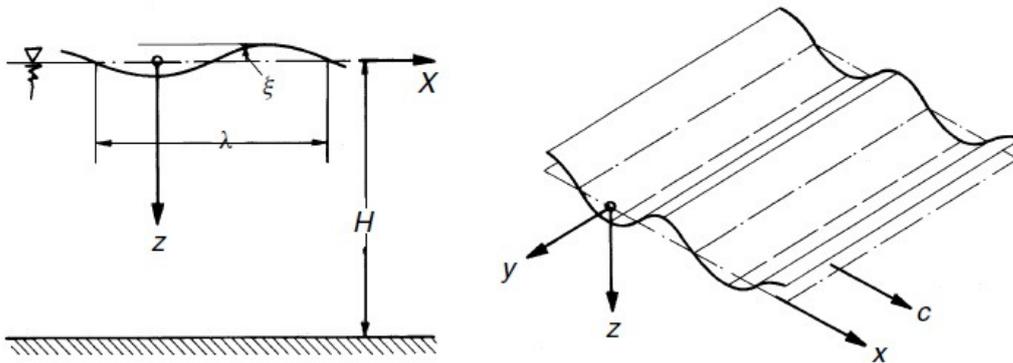
Regelmäßigen sinusförmigen Wellen, die im Folgenden als Elementarwellen bezeichnet werden, liegen der linearen Wellentheorie von Airy-Laplace zu Grunde. In Abbildung 2.3 ist das Koordinatensystem zur Beschreibung einer Welle dargestellt, in der  $\lambda$  die Wellenlänge,  $\xi$  die Amplitude, welche im Folgenden als  $A_\xi$  bezeichnet wird,  $H$  die Wassertiefe,  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit und  $x$  bzw.  $z$  die Koordinatenlaufrichtung repräsentiert. Die Wellenausbreitung erfolgt in positive  $x$ -Richtung und die  $z$ -Koordinate verläuft positiv nach unten. Regelmäßige Wellen sind durch einen Längenparameter  $\lambda$  oder der Wellenzahl  $k$ , der Wellenamplitude  $A_\xi$  und einen Zeitparameter, der Periode  $T_p$  oder der Kreisfrequenz  $\omega$ , festgelegt. Gleichung (2.9) und Gleichung (2.10) setzen die Längen- bzw. Zeitparameter in ein Verhältnis:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.9)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p} . \quad (2.10)$$

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit berechnet sich nach Gleichung (2.11):

$$c = \frac{\lambda}{T_p} = \frac{\omega}{k} . \quad (2.11)$$



**Abbildung 2.3:** Elementarwelle [7]

In dieser Bachelorthesis wird sich ausschließlich mit der Wellengenerierung in tiefem Wasser befasst, daher werden Flachwassereffekte nicht berücksichtigt und alle Formeln aus diesem Kapitel für die Wellenerzeugung beziehen sich auf tiefes Wasser, das durch Gleichung (2.12) definiert ist:

$$H > \frac{\lambda}{2} . \quad (2.12)$$

Dabei steht  $H$  für die Wassertiefe. Infolge der Betrachtung von Wellen in tiefem Wasser ergeben sich zusätzliche Gleichungen für  $k$  und  $c$ :

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad (2.13)$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{gT_p}{2\pi} . \quad (2.14)$$

Dadurch kann an jedem Ort  $x, y$  zur Zeit  $t$  die Auslenkung der Wasseroberfläche bestimmt werden. In Gleichung (2.15) stellt  $\hat{A}_\zeta$  die komplexe Amplitude von  $A_\zeta$  dar:

$$A_{\zeta}(x, y, t) = \operatorname{Re}\left(\hat{A}_{\zeta} e^{i(\omega t - k[x \cos(\mu) + y \sin(\mu)] + \varphi)}\right). \quad (2.15)$$

Die lineare Wellentheorie nach Airy-Laplace liegt der Annahme der Potenzialströmung zu Grunde. Es wird davon ausgegangen, dass die Strömung reibungsfrei, inkompressibel und rotationsfrei ist. Das Potenzial einer Welle, welche sich in  $x$ -Richtung ausbreitet, lässt sich durch Gleichung (2.16) beschreiben:

$$\phi = \operatorname{Re}\left(-ic\hat{A}_{\zeta} e^{-kz} e^{i(\omega t - kx)}\right). \quad (2.16)$$

Aus dem Potenzial der Welle kann die Geschwindigkeit abgeleitet werden:

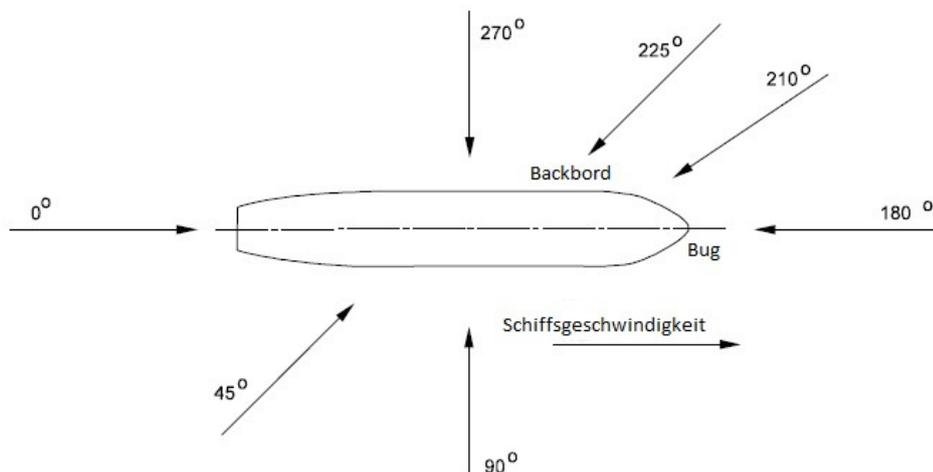
$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \phi_x = \operatorname{Re}\left(-\omega \hat{A}_{\zeta} e^{-kz} e^{i(\omega t - kx)}\right)$$

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \phi_z = \operatorname{Re}\left(i\omega \hat{A}_{\zeta} e^{-kz} e^{i(\omega t - kx)}\right).$$

Zusätzlich muss ein Begegnungswinkel  $\mu$  zwischen der Wellenlaufrichtung und der Fahrtrichtung des Schiffes definiert werden. Mit Hilfe des Begegnungswinkels kann auf die Begegnungsfrequenz  $\omega_e$  (Gleichung (2.17)) geschlossen werden:

$$\omega_e = |\omega - ku \cos(\mu)| = \left|\omega - \frac{\omega^2 u}{g} \cos(\mu)\right|. \quad (2.17)$$

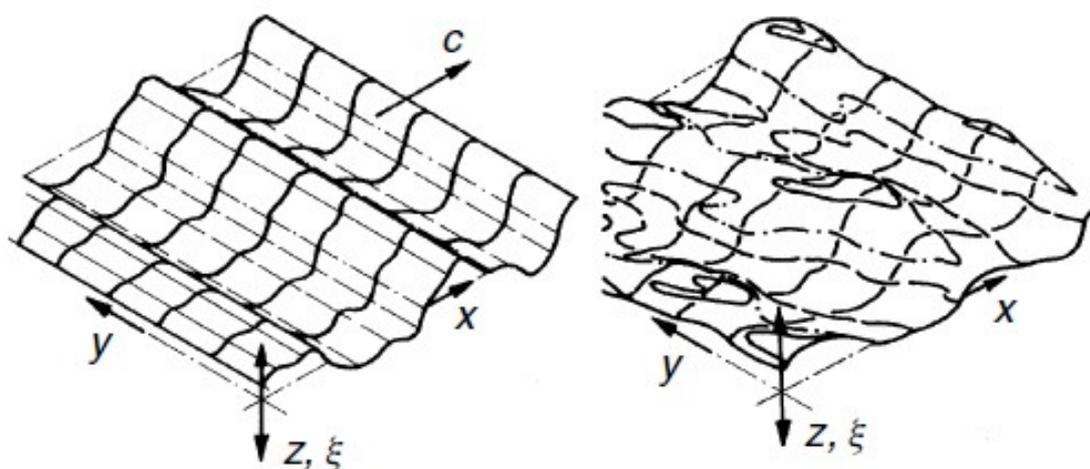
In Gleichung (2.17) bezeichnet  $u$  die Schiffsgeschwindigkeit. Abbildung 2.4 zeigt die Spezifizierung der Wellenrichtung. Wellen von Achtern werden mit  $\mu = 0^\circ$  definiert. Entgegengesetzt des Uhrzeigersinnes wird die Wellenrichtung positiv gezählt.



**Abbildung 2.4:** Definition der Wellenrichtung [14]

## 2.2.2 Langkämmiger Seegang

Natürlicher Seegang kann durch die Überlagerung von Elementarwellen angenähert werden. Dafür werden für die Elementarwellen die Wellenlänge  $\lambda$ , die Kreisfrequenz  $\omega$ , die Wellenamplitude  $A_\zeta$ , der Ausbreitungsrichtung  $\mu$  sowie die Phasenverschiebung  $\varphi$  variiert. Die Phasenverschiebung wird zufällig aus dem Intervall von 0 bis  $2\pi$  gewählt. Ein Seegang, der aus Elementarwellen mit gleicher Ausbreitungsrichtung  $\mu$ , aber unterschiedlichen Frequenzen zusammengesetzt ist, heißt langkämmiger Seegang. Abbildung 2.5 zeigt langkämmigen und kurzkämmigen Seegang. Kurzkämmiger Seegang bietet eine bessere Annäherung an natürlichen Seegang, da sich bei diesem auch die Ausbreitungsrichtung relativ zur  $x$ -Achse ändert.



**Abbildung 2.5:** Langkämmiger Seegang (links), kurzkämmiger Seegang (rechts) [7]

Um die Auslenkung der Wasseroberfläche eines langkämmigen Seeganges als Funktion des Ortes  $x, y$  und der Zeit  $t$  berechnen zu können, wird Gleichung (2.15) aufsummiert und ergibt Gleichung (2.18). Dies ist möglich, da nach der Wellentheorie von Airy-Laplace die Wirkung jeder Elementarwelle linear addierbar ist.

$$A_\zeta(x, y, t) = \sum_{j=1}^J \operatorname{Re} \left( \hat{A}_{\zeta_j} e^{i(\omega_j t - k_j [x \cos(\mu) + y \sin(\mu)] + \varphi_j)} \right) \quad (2.18)$$

Vereinfacht kann die Auslenkung  $A_\zeta$  zu einer bestimmten Zeit  $t$ , im Intervall  $t = 0$  bis  $T_p$ , die komplexen Amplituden  $\hat{A}_\zeta$  aus Gleichung (2.19) berechnet werden:

$$A_\zeta(t) = \sum_{j=1}^J \operatorname{Re} \left( \hat{A}_{\zeta_j} e^{i\omega_j t} \right) \quad \text{mit } \omega_j = j \cdot \frac{2\pi}{T_p} . \quad (2.19)$$

Der Begegnungswinkel kann für Gleichung (2.19) vernachlässigt werden, da in dieser Arbeit mit Wellen von  $\mu = 180^\circ$  gerechnet wird. Eine gute Quelle für die Beschreibung natürlichen Seeganges ist „Practical Ship Hydrodynamics“ von Volker Bertram [7] und [11].

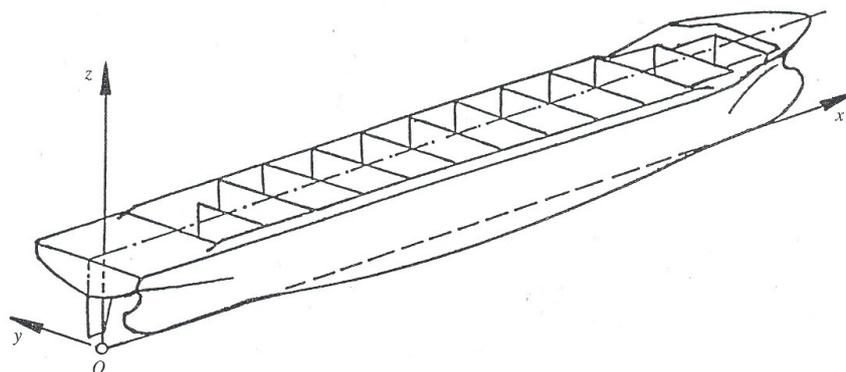
## 2.3 Schiffsbewegungen

### 2.3.1 Koordinatensysteme

In der vorliegenden Bachelorthesis wird ein schiffsfestes Koordinatensystem  $(x, y, z)$  verwendet, welches seinen Ursprung im hinteren Lot auf Höhe der Basis in der Schiffsmittle hat und die Schiffsbewegung mitmacht. Dadurch sind die Koordinatenaufrichtungen wie folgt definiert:

- Die  $x$ -Achse läuft entlang der Schiffslängsachse, wobei positiv in Richtung des Bugs gezählt wird
- Die  $y$ -Achse läuft entlang der Schiffsquerachse, wobei positiv in Richtung der Backbordseite gezählt wird
- Die  $z$ -Achse läuft entlang der Schiffshochachse, wobei positiv in Richtung der Aufbauten gezählt wird

Abbildung 2.6 zeigt das schiffsfeste Koordinatensystem, das lediglich dafür verwendet wird, um geometrische Eigenschaften eines Schiffes zu beschreiben und Referenzgrößen für die Netzerstellung zu erzeugen. In diesem Koordinatensystem hat der Schiffsschwerpunkt zeitlich unveränderbare Koordinaten  $(x_{COG}, y_{COG}, z_{COG})$ . Um die Bewegungsgleichung des Schiffes aufstellen zu können, wird außerdem noch ein initiales Koordinatensystem benötigt. Dieses fällt im zeitlichen Mittel mit dem  $x, y, z$ -Koordinatensystem zusammen, führt aber weder die translatorischen noch die rotatorischen Bewegungen des Schiffes mit aus. Die Koordinaten in diesem Initialsystem sind  $\xi, \eta, \zeta$ .



**Abbildung 2.6:** Schiffsfestes Koordinatensystem nach DIN 81 209-1 [8]

### 2.3.2 Definition der Freiheitsgrade

An einem Schiff stellt sich unter der Voraussetzung, dass die hydrodynamische Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft des Schiffes selbst ist und dass sich der horizontale Gewichtsschwerpunkt mit dem horizontalen Auftriebsschwerpunkt auf einer Wirkungslinie befinden, eine gleichmäßige Schwimmelage in glattem Wasser ein. Gleichung (2.20) beschreibt diese Schwimmelage. Ändert sich jedoch die Höhe des Wasserspiegels aufgrund der Oberflächenauslenkung der Welle am Schiff, so ändert sich die Verteilung des Auftriebs am Schiffskörper und damit die Lage des Auftriebsschwerpunktes. Aufgrund des verschobenen Auftriebsschwerpunktes, strebt das Schiff nach einem neuen Gleichgewichtszustand. Durch den zusätzlichen Einfluss von Wellen und deren Begegnungswinkel auf den Schiffskörper, ändert sich die Lage des Auftriebsschwerpunktes dynamisch, was neue Reaktionskräfte und -momente mit sich führt.

$$LCB = LCG . \quad (2.20)$$

Das Schiff kann sich in diesem System, das in Abbildung 2.7 dargestellt ist, in sechs Freiheitsgraden bewegen, wobei die Einzelbewegungen wie folgt definiert sind:

- horizontale Längsbewegung ( $x$ )
- Driftbewegung ( $y$ )
- Tauchbewegung ( $z$ )
- Rollbewegung um die Längsachse ( $\varphi$ )
- Stampfbewegung um die Querachse ( $\psi$ )
- Gierbewegung um die Hochachse ( $\vartheta$ )

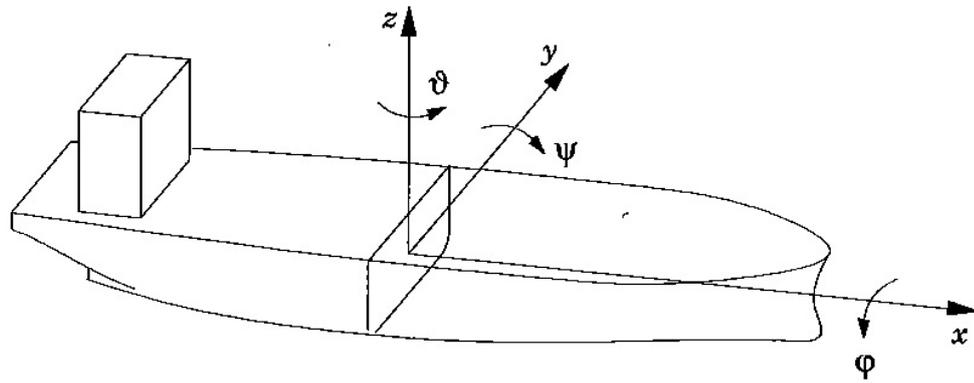


Abbildung 2.7: Freiheitsgrade eines Schiffes [10]

Details zu Koordinatensystemen, Freiheitsgraden und Schiffshydrodynamik sind [8] und [9] zu entnehmen.

### 2.3.3 Übertragungsfunktion

Um von dem Schiffsverhalten in regelmäßigen Wellen auf das Schiffsverhalten in natürlichem Seegang schließen zu können, wird die Übertragungsfunktion eingeführt. Die Voraussetzung für die Einführung einer Übertragungsfunktion ist ein lineares Verhältnis der Schiffsbewegung zur Oberflächenauslenkung des Wassers. Das bedeutet, dass bei einer harmonischen Anregung des Schiffes, dieses mit einer direkt proportionalen Antwortamplitude zur Erregeramplitude der Welle und mit gleicher Frequenz der Welle schwingt. Die Übertragungsfunktion enthält das direkte Verhältnis von Antwortamplitude und Erregeramplitude (Gleichung (2.21)):

$$H(\omega) = \frac{A_{A_\zeta}}{A_{E_\zeta}} e^{i\varphi} . \quad (2.21)$$

In Gleichung (2.21) stellt  $H(\omega)$  die Übertragungsfunktion und  $\varphi$  die Phasenverschiebung dar. Für jedes  $\omega$  gibt es ein Amplitudenverhältnis  $A_{A_\zeta}/A_{E_\zeta}$ . Dabei stellt  $A_{A_\zeta}$  die Amplitude des Ausgangssignals und  $A_{E_\zeta}$  die Amplitude des Eingangssignals dar. Der Betrag  $|H(\omega)|$  wird über  $\omega$  aufgetragen um die Übertragungsfunktion in Abhängigkeit der Kreisfrequenz darzustellen:

$$|H(\omega)| = \frac{A_{A_\zeta}}{A_{E_\zeta}} . \quad (2.22)$$

Einen genaueren Einblick in diesen Abschnitt bietet [10].

### 2.3.4 Einsatz von Wellenpaketen nach *G. F. Clauss*

Nach dem Ansatz von *G. F. Clauss* [13] ist es für Modellversuche im Wellenkanal möglich, die Übertragungsfunktion für die Tauch- und Stampfbewegung mittels eines Gaußschen Wellenpaketes wesentlich schneller zu ermitteln als mit einzelnen Elementarwellen oder einem Seegangsspektrum. Die Auswertung erfolgt mit einer Fourier-Transformation der gemessenen Daten am Modell.

## 2.4 Fourier-Reihen

Eine nicht-sinusförmige periodische Funktion  $y(t)$  mit der Kreisfrequenz  $\omega_0$  und der Periode  $T = 2\pi/\omega_0$  ist in eine unendlich große Summe von sinus- und kosinusförmigen Einzelschwingungen zerlegbar. Die Komponenten der Zerlegung werden als harmonische Bestandteile bezeichnet, wobei es sich dabei um Grundschwingung und Oberschwingungen handelt:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + b_n \cdot \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.23)$$

Die Fourierkoeffizienten der Zerlegung werden aus Integralformeln berechnet:

$$a_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_{(T)} y(t) dt \quad (2.24)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{(T)} y(t) \cdot \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2.25)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{(T)} y(t) \cdot \sin(n\omega_0 t) dt . \quad (2.26)$$

$a_0, a_n, b_n$  sind als Fourierkoeffizienten deklariert,  $\omega_0$  ist die Kreisfrequenz der Grundschwingung und  $n\omega_0$  sind die Kreisfrequenzen der Oberschwingungen ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ).

Um von einer Funktion  $f(t)$  direkt auf das dazugehörige kontinuierliche Spektrum  $F(\omega)$  schließen zu können, kommt die Fourier-Transformation der Funktion zum Einsatz. Anders als bei der Fourier-Zerlegung treten bei der Fourier-Transformation alle Kreisfrequenzen aus dem Intervall  $-\infty < \omega < \infty$  auf. Die nicht-periodische zeitabhängige Funktion  $f(t)$  lässt sich nach der Sinus- und Kosinusschwingung entwickeln:

$$f(t) = \int_0^{\infty} [a(\omega) \cdot \cos(\omega t) + b(\omega) \cdot \sin(\omega t)] d\omega \quad (2.27)$$

$$a(\omega) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \cos(\omega t) dt \quad (2.28)$$

$$b(\omega) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega t) dt . \quad (2.29)$$

$a(\omega)$  und  $b(\omega)$  sind sogenannte Spektralfunktionen. Über die Spektralfunktionen kann auf das Amplitudenspektrum  $B(\omega)$  und das Phasenspektrum  $\varphi(\omega)$  geschlossen werden:

$$B(\omega) = \sqrt{[a(\omega)]^2 + [b(\omega)]^2} \quad (2.30)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{a(\omega)}{b(\omega)}\right) . \quad (2.31)$$

Die Spektralfunktionen  $a(\omega)$  und  $b(\omega)$  stehen im Zusammenhang zum Spektrum  $F(\omega)$ :

$$F(\omega) = \pi [a(\omega) - j \cdot b(\omega)] . \quad (2.32)$$

Spezifischere Erläuterungen liefert [6].



## 3 Berechnungsfall

### 3.1 Schiffs- und Stoffdaten

*MARIN* (MARitime REsearch Institute Netherlands) hat im Februar 2009 einen Leistungsvergleich von CFD-Simulationen mit verschiedenen Testfällen durchgeführt, an dem mehrere Unternehmen und Universitäten teilnahmen. Einer dieser Testfälle ist eine Fähre mit experimentell ermittelten Daten für die Schiffsbewegung in Elementarwellen. Tabelle 3.1 listet die notwendigen Parameter der Fähre auf, um diese in der Simulation abzubilden. Zusätzlich zu den Parametern steht eine *STL*-Datei (Standard Triangulation Language) zur Beschreibung des Schiffsrumpfes zur Verfügung. Der Rumpf des Schiffes ist in Abbildung B.1 dargestellt. Einige Daten, die in der Tabelle 3.1 nicht verzeichnet sind, müssen berechnet werden, damit eine Simulation aufgesetzt werden kann. Zu diesen Daten zählt die Masse der Fähre, die Massenträgheitsmomente um alle Achsen und die Lage des vertikalen Schwerpunktes bei eingetauchtem Schiff.

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Länge zwischen den Loten	$L_{pp}$	173.000	$m$
Breite	$B$	26.000	$m$
Tiefgang bei ebenem Kiel	$T$	6.300	$m$
Verdrängungsvolumen	$V$	15338	$m^3$
Horizontaler Schwerpunkt	$LCG$	78.301	$m$
Vertikaler Schwerpunkt	$KG$	12.412	$m$
Rollradius	$k_{xx}$	10.195	$m$
Rollradius	$k_{yy}$	45.482	$m$
Rollradius	$k_{zz}$	45.482	$m$

**Tabelle 3.1:** Fähre - Geometrie- und Stabilitätsdaten [14]

Die Masse der Fähre kann über das Verdrängungsvolumen bestimmt werden:

$$m = V \cdot \rho \quad (3.1)$$

$$m = 15338m^3 \cdot 1025 \frac{kg}{m^3} = \underline{\underline{15.72145 \cdot 10^6 kg}} .$$

Aus den Rollradien können mit Hilfe der Masse die Massenträgheitsmomente des gesamten Schiffes um die  $x$ -Achse,  $y$ -Achse und  $z$ -Achse bestimmt werden. Dies geschieht nach Gleichung (3.2):

$$I_{xx} = m \cdot k_{xx}^2 . \quad (3.2)$$

Da nur die Tauch- und Stampfbewegung untersucht werden, kann die Symmetrie genutzt werden damit nur das halbe Schiff modelliert werden muss. Daher reduziert sich auch die Masse entsprechend um die Hälfte. Soll das Massenträgheitsmoment um die  $x$ -Achse berechnet werden, wird der Rollradius  $k_{xx}$  und die Hälfte der aus Gleichung (3.1) bestimmten Masse in Gleichung (3.2) eingesetzt:

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \frac{m}{2} \cdot k_{xx}^2 \\ &= \frac{15.72145 \cdot 10^6}{2} kg \cdot 10.195^2 m^2 \\ &= \underline{\underline{0.817 \cdot 10^9 kg \cdot m^2}} . \end{aligned}$$

Äquivalent zu Gleichung (3.2) können die Massenträgheitsmomente um die  $y$ -Achse und die  $z$ -Achse errechnet werden. Da die Masse des Schiffes konstant ist und die Rollradien um die  $y$ -Achse und  $z$ -Achse gleich sind, müssen auch beide Massenträgheitsmomente gleich sein:

$$\begin{aligned} I_{yy} &= \frac{m}{2} \cdot k_{yy}^2 \\ &= \frac{15.72145 \cdot 10^6}{2} kg \cdot 45.482^2 m^2 \\ &= \underline{\underline{1.765 \cdot 10^{10} kg \cdot m^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{zz} &= m \cdot k_{zz}^2 \\ &= \frac{15.72145 \cdot 10^6}{2} kg \cdot 45.482^2 m^2 \\ &= \underline{\underline{1.765 \cdot 10^{10} kg \cdot m^2}} . \end{aligned}$$

Für eine ebene Schwimmlage muss der Auftriebsschwerpunkt gleich dem Gewichtsschwerpunkt sein. Aus Gleichung (2.20) folgt:

$$LCB = LCG = \underline{\underline{78.301m}} .$$

Die folgenden Stoffdaten und physikalischen Konstanten sind von *MARIN* verwendet worden. Die Stoffdaten aus Tabelle 3.2 beziehen sich auf Seewasser und Luft mit einer Temperatur von  $T = 293.15 K$ .

Beschreibung	Symbol	Wert	Einheit
Dichte des Wassers	$\rho_W$	1025	$kg m^{-3}$
Kinematische Viskosität des Wassers	$\nu_W$	$1 \cdot 10^{-6}$	$m^2 s^{-1}$
Dichte der Luft	$\rho_L$	1.204	$kg m^{-3}$
Kinematische Viskosität der Luft	$\nu_W$	$1.48 \cdot 10^{-5}$	$m^2 s^{-1}$
Erdbeschleunigung	$g$	9.810	$m s^{-2}$

**Tabelle 3.2:** Stoffdaten und physikalische Konstanten

Alle Geometrie- und Wellenparameter sind im Großausführungsmaßstab gegeben. Weiterhin sind alle Einheiten nach dem Konsens des Internationalen Einheitensystems (*SI*) angegeben, abgesehen von der Schiffsgeschwindigkeit.

In der Seefahrt wird die Geschwindigkeit eines Schiffes in Knoten [ $kn$ ] gemessen und muss daher noch in die *SI*-Einheit  $m \cdot s^{-1}$  umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt nach Gleichung (3.3):

$$1kn = \frac{1852 m}{3600 s} = 0.514 \bar{4} \frac{m}{s} \quad (3.3)$$

## 3.2 Wellenparameter

Für die experimentell erstellten Daten sind von *MARIN* periodische Wellen gewählt worden, deren Parameter der Tabelle 3.3 zu entnehmen sind. Versuche zur Ermittlung der Schiffsbewegung sind im Wellenkanal durchgeführt worden. Die aus dem Wellenkanal erhaltenen Modelldaten sind auf Vollmaßstab umgerechnet worden, sodass nur die auf Originalgröße bezogenen Wellenparameter und Bewegungsdaten angegeben sind.

Wellenfrequenz $\omega_0$ [rad/s]	Amplitude $A_\zeta$ [m]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	Begegnungswinkel $\mu$ [grad]	Geschwindigkeit $U$ [kn]
0.350	2.5	503.2	180	20
0.400	2.5	358.2	180	20
0.450	2.5	304.4	180	20
0.500	2.5	246.6	180	20
0.550	2.5	203.8	180	20
0.600	2.5	171.2	180	20
0.650	2.5	145.9	180	20
0.785	2.5	100.0	180	20

**Tabelle 3.3:** Elementarwelle - Experimentelle Wellenparameter [14]

Die Tauch- und Stampfbewegung des Schiffes aufgrund der Anregung der einzelnen Wellen sind in Tabelle 3.5 zu finden. Die Antwortamplituden für die translatorische und rotatorische Bewegung werden dimensionslos gemacht. Dies erfolgt nach Gleichung (3.4) und Gleichung (3.5), die nur andere Schreibweisen von Gleichung (2.22) sind:

$$z'_{COG} = z \cdot \frac{1}{A_\zeta} \quad (3.4)$$

$$\psi' = \psi \cdot \frac{1}{k \cdot A_\zeta} \quad (3.5)$$

In Gleichung (3.4) steht  $z$  für die Amplitude der Tauchbewegung und  $\psi$  für die Amplitude der Stampfbewegung. Dementsprechend sind  $z'$  und  $\psi'$  die dimensionslosen Amplituden. Für die Berechnung werden zwei verschiedene Amplituden verwendet. Zum einen die vorgegebene Amplitude von  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$ , zum anderen wird die Amplitude ins Verhältnis zur Wellenlänge gesetzt:

$$A_\zeta = \frac{\lambda}{200.0} \quad (3.6)$$

Der Tabelle 3.4 sind die Amplituden der Einzelwellen zu entnehmen. Aufgrund der Tatsache, dass die Antwortamplitude mit der Erregeramplitude dimensionslos gemacht wird, sollten die resultierenden Übertragungsfunktionen beider Simulationen nicht sehr stark voneinander abweichen.

Wellenfrequenz $\omega_0$ [rad/s]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	Amplitude $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$ [m]	Amplitude $A_\zeta = \frac{\lambda}{200} \text{ m}$ [m]
0.350	503.2	2.5	2.516
0.400	358.2	2.5	1.926
0.450	304.4	2.5	1.522
0.500	246.6	2.5	1.233
0.550	203.8	2.5	1.019
0.600	171.2	2.5	0.856
0.650	145.9	2.5	0.7295
0.785	100.0	2.5	0.500

**Tabelle 3.4:** Elementarwelle - Wellenamplituden

Daraus ergeben sich für die Simulation verschiedene Tauch- und Stampfbewegungen. Tabelle 3.5 zeigt für jede Frequenz die dimensionslosen Antwortamplituden für die Tauchbewegung  $z'_{COG}$  und für die Stampfbewegung  $\psi'$  aus den Experimenten.

Wellenfrequenz $\omega_0$ [rad/s]	Tauchbewegung $z'_{COG}$ [m/m]	Stampfbewegung $\psi'$ [rad]
0.350	0.8840	1.018
0.400	0.8110	0.995
0.450	0.7280	1.018
0.500	0.5790	0.916
0.550	0.4530	0.742
0.600	0.4340	0.474
0.650	0.2570	0.247
0.785	0.1210	0.027

**Tabelle 3.5:** Fähre - Experimentell ermittelte Amplituden [14]

### 3.3 Seegangsspektren

Für die Seegangssimulationen werden Wellenspektren erzeugt, die sich aus Elementarwellen gleicher Frequenz zusammensetzen (Tabelle 3.4). Die Amplituden sind, wie von *MARIN* vorgegeben, zum einen konstant ( $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$ ) und zum anderen mit einem Amplitudenverhältnis ( $A_\zeta/\lambda = 1/200$ ) gewählt worden. Den Tabellen 3.6 und 3.7 sind die Wellenkomponenten der Seegangsspektren zu entnehmen.

Wellenfrequenz $\omega_0$ [rad/s]	Amplitude $A_\zeta$ [m]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	Begegnungswinkel $\mu$ [grad]	Geschwindigkeit $u$ [m/s]
0.350	2.5	503.2	180	10.289
0.400	2.5	358.2	180	10.289
0.450	2.5	304.4	180	10.289
0.500	2.5	246.6	180	10.289
0.550	2.5	203.8	180	10.289
0.600	2.5	171.2	180	10.289
0.650	2.5	145.9	180	10.289
0.785	2.5	100.0	180	10.289

**Tabelle 3.6:** Wellenkomponenten des Wellenspektrums mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$

Wellenfrequenz $\omega_0$ [rad/s]	Amplitude $A_\zeta$ [m]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	Begegnungswinkel $\mu$ [grad]	Geschwindigkeit $u$ [m/s]
0.350	2.516	503.2	180	10.289
0.400	1.926	358.2	180	10.289
0.450	1.522	304.4	180	10.289
0.500	1.233	246.6	180	10.289
0.550	1.019	203.8	180	10.289
0.600	0.856	171.2	180	10.289
0.650	0.7295	145.9	180	10.289
0.785	0.500	100.0	180	10.289

**Tabelle 3.7:** Wellenkomponenten des Wellenspektrums mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

### 3.4 Variation der Amplitudenverhältnisse

Die Form des verwendeten Wellenspektrums ist ausschlaggebend für die Auswertung mit der Fourier-Transformation. Zu Beginn werden alle bekannten Wellen, jeweils mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis, zu einer unregelmäßigen Welle unter Verwendung von Gleichung (2.19) zusammengefasst. *OpenFOAM* besitzt Funktionen mit denen die Überlagerung von Elementarwellen automatisch vollzogen wird. Die unregelmäßigen Wellen besitzen alle Informationen der acht Elementarwellen aus den Einzelwellensimulationen. Im Resultat müssen alle acht Antwortamplituden aus der Zeitreihe der Simulation entnommen werden können.

Bereits im Leistungsvergleich von *MARIN* sind zwei Amplituden für die Simulationen vorgeschlagen worden. Gleichung (3.6) bezeichnet die Steilheit einer Welle. Für Wellen in tiefem Wasser ist die Grenzsteilheit nach Gleichung (3.7) definiert. Ab dieser Grenzsteilheit fangen die Wellen theoretisch an zu brechen (STOKES 1874).

$$\frac{A_{\zeta}}{\lambda} = 0.142 \quad (3.7)$$

In der Praxis werden Steilheiten von  $A_{\zeta}/\lambda \geq 0.1$  bis 0.0667 kaum erreicht [11]. Die größte Wellensteilheit für die Simulationen mit konstanter Amplitude wird mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 100 \text{ m}$  und einer Amplitude von  $A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$  erreicht. Sie beträgt 0.025. Weiterhin werden Simulationen für verschiedene Steilheiten vorgenommen, um den Einfluss der Form des Spektrums auf das Ergebnis zu ermitteln. Die zusätzlich verwendeten Amplitudenverhältnisse sind in Tabelle 3.8 zu finden. Die berechneten Amplitudenverhältnisse sind alle kleiner als die in der Praxis auftretenden Steilheiten.

Nummer	1	2	3	4	5
$A_{\zeta}/\lambda$	1/200	1/250	1/300	1/350	1/400

**Tabelle 3.8:** Übersicht Amplitudenverhältnis



## 4 Simulation

### 4.1 Dämpfung einzelner Wellenkomponenten

Bei der Simulation mit Wellen, seien es Elementarwellen oder Wellenspektren, ist darauf zu achten, dass die Wellen nicht durch eine zu grobe Gitterstruktur gedämpft werden. Aus diesem Grund werden Voruntersuchungen auf einem vereinfachten 2-D Gitter vollzogen. Das Gitter muss so fein gewählt werden, dass das Eingangssignal ohne Verluste an einem beliebigen Punkt im Gitter erhalten bleibt. Das Gitter für die Kontrolle zur Dämpfung einzelner Wellenkomponenten orientiert sich an den Maßen des Grundgitters aus Abschnitt 4.2.1 und der Tabelle 4.2. Die Verfeinerungsvolumen und -flächen sind auch wie bei dem Simulationsgitter gewählt worden. In Querrichtung ist das Lösungsgebiet mit einer Zellschicht diskretisiert. In Abbildung B.2 ist das verwendete Gitter abgebildet. Das Gitter besitzt eine Größe von ca. 23 000 Zellen und die Berechnung wird mit einem Prozessor durchgeführt. Die Randbedingungen und numerischen Einstellungen sind Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 zu entnehmen. Ein Unterschied besteht jedoch für die Flächen  $y_{min}$  und  $y_{max}$ . Beide sind als Symmetrieflächen definiert. Der verwendete Löser basiert auf einem *PISO*-Algorithmus.

Die Gitter für die Seegangssimulationen sind im Bereich der freien Oberfläche und im Bereich der Orbitalgeschwindigkeit unterhalb der Wasseroberfläche verfeinert, um Wellen darstellen zu können. Jedoch sind sich beide Gitter in Bezug auf die verwendeten Verfeinerungsvolumen und -flächen sehr ähnlich. Daher kann angenommen werden: Wenn das Eingangssignal der Simulation auf dem Gitter für die Wellendämpfung nicht beeinflusst wird, dann wird es auf den Gittern für die Seegangssimulation auch nicht beeinflusst.

Es werden Simulationen für zwei verschiedene Eingangssignale durchgeführt. Zum einen handelt es sich um eine Elementarwelle mit einer Amplitude  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$ , einer Wellenlänge von  $\lambda = 246.6 \text{ m}$ , einer Wellenfrequenz von  $\omega_0 = 0.5 \text{ rad/s}$  und einem Begegnungswinkel von  $\mu = 180^\circ$ . Zum anderen handelt es sich um eine Seegangssimulation mit einem Amplitudenverhältnis von  $A_\zeta = 1/450$ . Die Parameter der acht Wellenkomponenten sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Es wird eine zusätzliche Strömungsgeschwindigkeit von  $u = 10.0 \text{ m/s}$  eingestellt, entsprechend der Vorranggeschwindigkeit bei den Simulationen mit Schiff.

Wellenfrequenz $\omega_0$ [rad/s]	Amplitude $A_\zeta$ [m]	Wellenlänge $\lambda$ [m]	Geschwindigkeit $u$ [m/s]
0.350	1.1182	503.200	10
0.400	0.8560	358.200	10
0.450	0.6764	304.400	10
0.500	0.5480	246.600	10
0.550	0.4529	203.800	10
0.600	0.3804	171.200	10
0.650	0.3242	145.900	10
0.785	0.2222	100.000	10

**Tabelle 4.1:** Wellenkomponenten des Wellenspektrums

## 4.2 Gittergenerierung

Die Gittererzeugung wird mit modifizierten *OpenFOAM* Werkzeugen realisiert. Bei diesen Werkzeugen handelt es sich um *blockMesh*, *snappyHexMesh* und *refineMesh*, die dahingehend verändert worden sind, dass sie über ein Programm gemeinsam gesteuert werden können. Es können verschiedene Parameter in dem Programm verändert, hinzugefügt oder gelöscht werden. Dies muss gemacht werden, da es für die Berechnung von unterschiedlichen Unbekannte, beispielsweise Kräfte oder Bewegungen, nötig ist, das Gitter anzupassen. Die Generierung des Gitters wird im Folgenden Abschnitt behandelt.

### 4.2.1 Grundgitter

Die Wahl des Grundgitters ist von einigen Faktoren abhängig. Zum einen sollte die Größe so gewählt werden, dass ein schnelles Ergebnis erzielt werden kann, zum anderen muss es fein genug sein, um die Physik der Strömung nicht zu verändern oder zu verfälschen. Spezielle Gebiete im Gitter müssen zusätzlich verfeinert werden um alle nötigen Eigenschaften der Strömung auflösen zu können.

Durch das Werkzeug *blockMesh* wird ein blockstrukturiertes Netz mit einer einheitlichen Zellgröße in jede Koordinatenrichtung erstellt. Der Koordinatenursprung liegt im hinteren Lot des Schiffes. Von diesem Punkt aus werden nach Tabelle 4.2 die Längen in positive als auch in negative  $x$ -Richtung und  $z$ -Richtung verwendet. Da es sich um ein symmetrisches Netz handelt, ist nur die positive  $y$ -Richtung für die Erzeugung des Blocknetzes von Relevanz.

Richtung	Bezug	Wert	Einheit
$x_{max}$	-	500	$m$
$x_{min}$	$3.315 \cdot L_{pp}$	573.5	$m$
$y_{max}$	$1.1 \cdot L_{pp}$	189.5	$m$
$z_{max}$	$1.1 \cdot L_{pp}$	189.5	$m$
$z_{min}$	-	300	$m$

**Tabelle 4.2:** Gitterblock Grundmaße

Abbildung B.3 zeigt das erstellte Blocknetz mit ca. 185 000 Zellen. Die Werte für  $x_{max}$  und  $z_{min}$  sind ohne Bezug auf die Schiffslänge festgelegt worden. Es ist eine Wassertiefe nach Gleichung (2.12) festzulegen. Da die maximale Wellenlänge 503.2  $m$  beträgt, muss die Wassertiefe mindestens  $H = 251.6 m$  betragen. Ebenfalls die Zuflörmstrecke vor dem Schiff ist nach der Wellenlänge zu bestimmen. Bis zum Koordinatenursprung sollte eine komplette Welle abgebildet werden können.

*snappyHexMesh* schneidet den Schiffsrumpf unter Verwendung der *STL*-Datei aus dem Blocknetz. Abbildung B.4 zeigt eine Verfeinerungsstufe, die für Seegangssimulationen angemessen ist.

Es sind zwei Volumenverfeinerungen und eine extrudierte Flächenverfeinerung zu erkennen. Die Flächenverfeinerung, die sich über die gesamte  $x$ -Richtung des Berechnungsgebietes erstreckt, dient der Auflösung der freien Oberfläche. Für die Einzelwellen ist eine Höhe des Verfeinerungsbereiches, die größer als die Wellenhöhe ist, ausreichend. Für die Wellenspektren muss die Höhe individuell der Überlagerung der Wellen angepasst werden. Beide Volumenverfeinerungen sollen die Orbitalgeschwindigkeiten der generierten Wellen auflösen. Dadurch wird sichergestellt, dass die am Einlass erzeugten Wellen nicht an Energie verlieren bevor sie auf das Schiff treffen. Im letzten Schritt der Gittererstellung werden in alle Koordinatenaufrichtungen Expansionsfaktoren eingeführt. Abbildung B.2 zeigt beispielsweise, dass die Zellen am Auslass in  $x$ -Richtung wesentlich größer sind als die Zellen am Einlass, um die Wellen numerisch zu dämpfen. Die Wellen, die das Schiff passiert haben, werden durch zusätzlich aufgebrauchte Quellterme weggedämpft. Trotzdem dürfen die Zellverzerrungen und das Kantenlängenverhältnis nicht zu groß werden, da bereits durch wenige schlechte Zellen die Konvergenz gefährdet werden kann.

Die gesamte Größe des ersten Gitters beläuft sich auf ca. 420 000 Zellen. Ab einer Gittergröße von 100 000 Zellen wird die Simulation parallel vollzogen. Die 420 000 Zellen des ersten Gitters werden auf 4 Prozessoren verteilt, sodass auf jeden Prozessor nicht wesentlich mehr als 100 000 Zellen verteilt werden.

## 4.2.2 Verfeinerung des Grundgitters

Für die Generierung der Verfeinerungsstufe werden die gleichen Werkzeuge wie zur Erstellung des Grundgitters verwendet. Zuvor muss die Auswertung aus Abschnitt 5.2 des Grundgitters bezüglich Stabilität der Simulation und Genauigkeit der Ergebnisse erfolgen. Durch die Veränderung eines Parameters in der Gittererzeugung, werden die Positionen aller Verfeinerungsvolumen und -flächen beibehalten, sodass sich einzig die Anzahl der Zellen verändert. Dies geschieht damit ein Vergleich zwischen den Gittern erfolgen kann.

Die gesamte Größe des zweiten Gitters beläuft sich auf ca. 1 070 000 Zellen. Damit werden 10 Prozessoren eingesetzt um die Simulation parallel laufen zu lassen.

Zudem wird ein zweite Verfeinerungsstufe des Grundgitters erstellt um zu überprüfen, ob die erste Verfeinerungsstufe ausreicht um die Schiffsbewegung darzustellen (Gitterunabhängige Lösung).

Die gesamte Größe der zweiten Verfeinerungsstufe beläuft sich auf ca. 1 850 000 Zellen. Damit werden 19 Prozessoren eingesetzt um die Simulation parallel laufen zu lassen.

## 4.2.3 Gitterübersicht

Einen Überblick über die verwendeten Gitter für Einzelwellen und Wellenspektren geben Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4. Gitter 1 bildet das Grundgitter ab, Gitter 2 die erste Verfeinerungsstufe und Gitter 3 die zweite Verfeinerungsstufe.

Gitter	Anzahl Zellen	Anzahl Prozessoren
1	420 000	4
2	1 070 000	10
3	1 850 000	19

**Tabelle 4.3:** Gitterübersicht für Einzelwellen

## 4.2.4 Gitter für Simulationen mit Wellenspektren

Die Grundlage des Gitters für die Simulationen mit den Wellenspektren stellt die erste Verfeinerungsstufe des Grundgitters dar. Dies wird mit der Auswertung aus Abschnitt 5.2 begründet. Die einzige Modifikation des zweiten Gitters ist die Flächenverfeinerung. Aus der Überlagerung der Elementarwellen resultiert eine größere Wellenhöhe als bei den einzelnen Elementarwellen. Für die unterschiedlichen Wellenspektren ergibt sich eine abweichende Anzahl von Zellen und verwendeter Prozessoren. Tabelle 4.4 zeigt die Anzahl der Zellen und der verwendeten Prozessoren

für die Simulation des Wellenspektrums mit konstanter Amplitude. Da die Wellenhöhe für die anderen Wellenspektren abnimmt, verringert sich auch die Anzahl der Zellen. Sie bleibt aber über 1 200 000 Zellen. Daher werden auch für die übrigen Simulationen mit unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen 13 Prozessoren verwendet.

–	Anzahl Zellen	Anzahl Prozessoren
Wellenspektrum	ca. 1 240 000	13

**Tabelle 4.4:** Gitterübersicht für Wellenspektrum

## 4.3 Simulationsparameter

### 4.3.1 Randbedingung

Abbildung B.3 zeigt das erstellte Blocknetz. Abbildung B.5 zeigt die begrenzenden Flächen des Berechnungsgebietes. Der aus dem Blocknetz geschnittene Schiffsrumpf wird nicht gesondert dargestellt. Tabelle 4.5 veranschaulicht für jede Fläche den dazugehörigen Typ und die zugehörige Randbedingung. Als *Dirichlet*-Randbedingung wird eine Randbedingung bezeichnet, bei der der Funktionswert normal zum Rand vorgegeben wird. Als *Neumann*-Randbedingung wird eine Randbedingung bezeichnet, bei der der Gradient der Lösungsvariable normal zum Rand vorgegeben wird. Das Thema Randbedingungen ist in [1], [2], [3], [4], [5] genauer definiert.

$x_{max}$  ist als Einlass mit einer speziellen *Dirichlet*-Randbedingung für die Geschwindigkeit und den Zellfüllgrad belegt. Dabei wird nach der linearen Wellentheorie von Airy-Laplace die Geschwindigkeit und der Zellfüllgrad eines Volumenelementes vorgegeben. Der Druck wird durch die *Neumann*-Randbedingung mittels der Erhaltungsgleichungen berechnet. Die Werte für  $k$  und  $\omega$  werden auch wie die Geschwindigkeit durch eine *Dirichlet*-Randbedingung vorgegeben.

Für  $x_{min}$  ist der Druck mit einer *Dirichlet*-Randbedingung festgelegt. Durch die hydrostatische Druckverteilung wird der Druck für jedes Volumenelement definiert. Geschwindigkeit und Zellfüllgrad werden über die Erhaltungsgleichung gelöst, da sie durch eine *Neumann*-Randbedingung festgelegt sind. Auch  $k$  und  $\omega$  werden über eine *Neumann*-Randbedingung definiert

Für  $z_{max}$  als oberer Rand wird der Druck als Atmosphärendruck vorgeschrieben. Die Außenhaut des Schiffes ist als *movingWall* definiert, sodass die Tangentialgeschwindigkeit als Wandgeschwindigkeit entsprechend der Schiffsbewegung betrachtet werden kann.  $y_{min}$  ist als nicht-durchströmte Fläche deklariert. Ebenfalls gelten an der Außenhaut des Schiffes spezielle Randbedingungen für die Turbulenzgrößen  $k$  und  $\omega$ , die durch eine *FutureShip* Wandfunktion definiert sind.

Für die Flächen  $z_{min}$  und  $y_{max}$  sind alle Randbedingungen gleich vorgegeben.

Fläche	Typ	Randbedingung				
		$u$	$p$	$\alpha$	$k$	$\omega$
$x_{min}$	Auslass	Neumann	Dirichlet	Neumann	Neumann	Neumann
$x_{max}$	Einlass	Dirichlet	Neumann	Dirichlet	Dirichlet	Dirichlet
$y_{min}$	Symmetrierand	Symmetrie	Symmetrie	Symmetrie	Symmetrie	Symmetrie
$y_{max}$	Äußerer Rand	Dirichlet	Neumann	Neumann	Neumann	Neumann
$z_{min}$	Unterer Rand	Dirichlet	Neumann	Neumann	Neumann	Neumann
$z_{max}$	Oberer Rand	Neumann	Dirichlet	Neumann	Neumann	Neumann
HULL	Wand	movingWall	Neumann	Neumann	WallFunction	WallFunction

Tabelle 4.5: Randbedingungen - Übersicht

### 4.3.2 Zusätzlicher Quellterm: Volumenkraft

Damit das Berechnungsgebiet nicht unverhältnismäßig groß gewählt werden muss, um Reflektionen von den Rändern zu vermeiden, werden zusätzliche Quellterme eingeführt, die die Lösung in der Nähe des Randes auf die theoretische Lösung, die durch die Randbedingung definiert ist, setzt.

Gleichung (4.1) beschreibt mathematisch eine Volumenkraft (engl. *Body Force*).  $\vec{v}_0$  ist der theoretisch existente Vektor des Geschwindigkeitsfeldes im Kontrollvolumen.  $\vec{v}$  ist der tatsächliche Geschwindigkeitsvektor im Kontrollvolumen. Mit dem derzeitigen Zeitschritt kann aus der Differenz beider Geschwindigkeitsvektoren eine Beschleunigung errechnet werden.  $V$  bezeichnet das Kontrollvolumen,  $\rho_w$  die Dichte des Wasser,  $\alpha$  steht für den Zellfüllgrad und  $\gamma$  für einen Relaxationsfaktor. Angesetzt werden die Quellterme in einem definiertem Abstand vom Schiff. Die spezifische Umsetzung der Volumenkraft ist ein *FutureShip* interner Algorithmus.

$$\vec{BF} = -\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t} \cdot V \cdot \rho_w \cdot \alpha \cdot \gamma \quad (4.1)$$

Ein numerische Strand (engl. beach) hinter dem Schiff ist ein ähnlicher Quellterm, der die Wellen komplett wegdämpft, damit keine Wellen am Auslass reflektiert werden.

### 4.3.3 sixDoF-Löser

In Abschnitt 2.3.2 ist auf die Freiheitsgrade eines Schiffes eingegangen worden. Damit das Schiff alle translatorischen und rotatorischen Bewegungen durchführen kann, muss das Lösungsverfahren alle Bewegungen ermöglichen. Der *sixDoF*-Löser (**six-Degrees of Freedom**) erlaubt die Berechnung aller sechs Bewegungen. In diesem Verfahren werden in jedem Zeitschritt die Kräfte über den Schiffsrumpf integriert,

mit deren es dann möglich ist die Bewegungsgleichungen zu lösen. Anschließend erfolgt eine Gitterverformung. Abbildung B.6 zeigt einen Bereich der Gitterverformung. Das Gitter direkt am Schiff, das in der Mitte der Abbildung zu erkennen ist, kann sich komplett verformen. Die Bereiche, die rot dargestellt sind, können sich nicht verformen. Zwischen beiden Bereichen wirkt eine Funktion, die die Gitterverformung steuert. Die Umsetzung der Gitterverformung ist ein *FutureShip* interner Algorithmus. Die Werkzeuge des *sixDoF*-Lösers sind Quaternionen und Septernionen, die unter Verwendung des Euler-Winkels konstruiert werden können. Die Abhandlung von R. Shivarama und E. P. Fahrenthold [12] liefert die notwendigen Kriterien für Erstellung der Matrizen zur Berechnung der Bewegungen.

#### 4.3.4 Numerische Einstellungen

Alle Simulationen werden mit einem variablen Zeitschritt durchgeführt. Die limitierende Größe für den maximalen Zeitschritt ist durch die CFL-Zahl (Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl) vorgegeben. Der Zeitschritt wird so angepasst, dass die maximale CFL-Zahl einen Wert von 0.5 nicht überschreitet. Die maximale Simulationszeit für die Einzelwellen ist mit 100 Sekunden und für die Seegangssimulationen mit 300 Sekunden festgelegt. Die Zeitintegration wird über das implizite Eulerverfahren integriert. Tabelle 4.6 gibt einen Überblick über die verwendeten Löser, Diskretisierungsschemata und die Unterrelaxationen. Eine genauere Erläuterung der Löser kann auf der *OpenFOAM*-Homepage [15] nachgelesen werden.

Die Diskretisierungsschemata sind ebenfalls auf der *OpenFOAM*-Homepage [16] zu finden.

Die Unterrelaxationen bedeuten, dass die neuen Größen nicht mit den gesamten Korrekturgrößen bestimmt werden, sondern nur einem anteilig.

Größe	Löser	Diskretisierungsschema	Unterralaxation
$u$	<i>PBiCG</i>	<i>limitedLinearV</i> für Wasser	0.7
$u$	<i>PBiCG</i>	<i>upwind</i> für Luft	0.7
$p$	<i>PCG</i>	–	0.3
$pd$	<i>PCG</i>	–	0.3
$pcorr$	<i>GAMG</i>	–	–
$alpha$	<i>PBiCG</i>	<i>vanLeer</i>	–
$k$	<i>PBiCG</i>	<i>upwind</i>	0.5
$omega$	<i>PBiCG</i>	<i>upwind</i>	0.5

**Tabelle 4.6:** Numerische Einstellungen - Übersicht

## 5 Auswertung

### 5.1 Dämpfung einzelner Wellenkomponenten

Der Abbildung B.7 ist das Ergebnis der Simulation mit der Elementarwelle zu entnehmen. Der rote Graph beschreibt das Eingangssignal und der grüne Graph das von *OpenFOAM* berechnete Ausgangssignal. Das Eingangssignal ist der theoretische Verlauf der Welle und das Ausgangssignal ist die Oberflächenauslenkung des Wassers. Auf der Ordinate ist die Amplitude und auf der Abszisse ist die Zeit aufgetragen. Die Simulationszeit beträgt 150 Sekunden. Dies ist für die Elementarwelle und das Wellenspektrum ausreichend um zu überprüfen, ob das Ausgangssignal dem Eingangssignal entspricht. Bis auf wenige Ausnahmen stimmen beide Signale sehr gut überein. Teilweise wird die Amplitude des Eingangssignals über- und unterschätzt. Gemittelt über alle Amplituden beträgt die Abweichung weniger als 1% zum Eingangssignal. Für die Elementarwellensimulation ist diese Abweichung klein genug, um sagen zu können, dass die tatsächliche Anregung des Schiffes der theoretischen Anregung entspricht.

In Abbildung B.8 ist das Ergebnis der Simulation mit dem Wellenspektrum zu finden. Auch hier stellt der rote Graph das theoretische Eingangssignal und der grüne Graph das durch *OpenFOAM* berechnete Ausgangssignal dar. Wie auch bei der Berechnung mit der Elementarwelle ist die Abweichung des Ausgangssignals sehr gering. Daraus kann geschlossen werden, dass die Gitterfeinheit genügt um alle Wellenkomponenten aus dem Spektrum, sowohl die kurzen als auch die langen, darstellen zu können.

### 5.2 Untersuchung einer unabhängigen Gitterlösung

Im Rahmen dieser Bachelorthesis soll unter anderem der Einfluss des gewählten Gitters auf die Ergebnisse der Simulation untersucht werden. Insgesamt werden drei Gitter miteinander verglichen. Die Tabellen A.5 bis A.8 zeigen die prozentuale Abweichung der drei verwendeten Gitter mit den dazugehörigen Lösungsalgorithmen. Dabei ist zu beachten, dass die prozentuale Abweichung des ersten Gitters auf die experimentelle Datenreihe bezogen ist. Die Abweichung des Ergebnisses des zweiten

Gitters bezieht sich auf die Abweichung von dem Ergebnisses des ersten Gitters. Die prozentuale Differenz des dritten Gitters bezieht sich auf die Abweichung vom zweiten Gitters.

Wird die fünfte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 m$  beispielhaft betrachtet, dann beträgt die Abweichung des Ergebnisses für das erste Gitter unter Verwendung des *PISO*-Algorithmus 14.269% zu dem Ergebnis aus den experimentellen Daten. Die Abweichung von fast 15% kann auf fehlerhafte Daten der Experimente hindeuten, da auch andere Einrichtungen für diese Elementarwelle ähnliche Abweichungen errechnet haben. Hingegen weicht das Ergebnis des zweiten Gitters um 1.076% vom Ergebnis des ersten Gitters ab. Das Ergebnis des dritten Gitters weicht nur noch um 0.404% vom Resultat des zweiten Gitters ab. Dies deutet auf eine hinreichende Genauigkeit des zweiten Gitters hin.

Aus den Tabellen A.9 und A.10 sind die Prozessorzeiten für jede Simulation mit dem *PISO*-Algorithmus und *SIMPLE*-Algorithmus zu entnehmen. Die Prozessorzeit ist die Zeit, die alle Prozessoren zusammen benötigen um die Simulation von der Startzeit bis zur Endzeit durchzuführen. Die Prozessorzeit  $t_{proc}$  berechnet sich durch Gleichung (5.1):

$$t_{proc} = t_{ex} \cdot n_{proc} \cdot \quad (5.1)$$

$t_{ex}$  ist die erforderliche Durchführungszeit der Simulation und  $n_{proc}$  ist die Anzahl der verwendeten Prozessoren, welche Tabelle 4.3 zu entnehmen sind.

In den Tabellen A.5 bis A.10 fehlen für das dritte Gitter teilweise Daten. Dies hat den Grund, dass nicht genügend Prozessoren auf dem verwendeten Cluster zur Verfügung standen um alle Simulationen zu realisieren. Stichprobenartig sind für die Amplituden  $A_\zeta = 2.5 m$  und für das erste Amplitudenverhältnis jeweils zwei Simulationen mit dem *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus vorgenommen worden. Die minimalen Abweichungen aus diesen Simulationen im Vergleich zu den Lösungen aus dem zweiten Gitter und unter Berücksichtigung der erheblich Größen Prozessorzeit lässt nur den Schluss zu, dass das dritte Gitter nicht für die weiteren Simulationen zu verwenden ist.

Elementarwelle	Gitter 2	
	Differenz in [%]	
	$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta \neq 2.5 m$
1	67.4	169.7
2	39.7	140.1
3	70.1	67.9
4	44.21	50.3
5	29.6	46.4
6	27.9	38.8
7	21.9	137.8
8	20.8	48.1

**Tabelle 5.1:** Differenz der Prozessorzeit in Prozent für das zweite Gitter

Tabelle 5.1 zeigt die Differenz der Prozessorzeiten von *PISO*- zum *SIMPLE*-Algorithmus auf dem zweiten Gitter. Zu erkennen ist, dass alle Simulationen mit dem *SIMPLE*-Algorithmus schneller sind als die Simulationen mit dem *PISO*-Algorithmus. Alle Simulationen mit dem *SIMPLE*-Algorithmus sind mindestens um 20% schneller. Teilweise sind Differenzen von über 50% oder 100% erkennbar. Da das dritte Gitter nur stichprobenartig untersucht worden ist, wird es in Tabelle 5.1 nicht aufgeführt. Eine Differenz der Prozessorzeiten lässt sich jedoch mit Hilfe von den Tabellen A.9 und A.10 und Gleichung (5.1) berechnen.

## 5.3 Einzelwellen

Die Übertragungsfunktionen der Fähre aus den experimentellen Versuchen sind bereits bekannt. Für die Einzelwellensimulationen und für die Seegangssimulationen wird ausschließlich das zweite Gitter verwendet. Den Tabellen A.1 bis A.4 sind die Antwortamplituden der Simulation mit dem *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus für die Tauch- und Stampfbewegung für jede Elementarwelle mit konstanter Erregeramplitude und mit dem ersten Amplitudenverhältnis zu entnehmen.

Durch die Erreger- und Antwortamplitude aus Tabelle A.1 und Tabelle A.3 kann die dimensionslose Antwortamplitude für die Tauchbewegung nach Gleichung (3.4) errechnet werden. Äquivalent geschieht dies für die Stampfbewegung unter Verwendung von Tabelle A.2 und Tabelle A.4 und der Gleichung (3.5). Für die Elementarwellen mit dem ersten Amplitudenverhältnis sind keine experimentellen Daten vorhanden, deshalb werden sie mit der bekannten Übertragungsfunktion aus der experimentellen Datenreihe verglichen. Tabelle 5.2 enthält die Übertragungsfunktionen für die Tauchbewegung und Tabelle 5.3 die Übertragungsfunktionen für die Stampfbewegung. Dabei ist für den *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus jeweils das  $|H(\omega_0)|$  für die Simulation mit konstanter Amplitude ( $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$ ) und mit dem ersten Amplitudenverhältnis ( $A_\zeta/\lambda = 1/200$ ) aufgeführt.

Elementarwelle	$ H(\omega_0) $ für Gitter 2				
	exp. Datenreihe	<i>PISO</i> -Alg.		<i>SIMPLE</i> -Alg.	
		$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$
[–]	[–]	[–]	[–]	[–]	
1	0.884	0.8604	0.8629	0.9160	0.8923
2	0.811	0.8492	0.8468	0.8892	0.8925
3	0.728	0.7600	0.7615	0.8204	0.8193
4	0.579	0.6052	0.6350	0.6928	0.6926
5	0.453	0.5280	0.5339	0.6008	0.5574
6	0.434	0.5456	0.4346	0.4932	0.4171
7	0.257	0.3456	0.2851	0.2892	0.2673
8	0.121	0.1128	0.1200	0.1036	0.1100

**Tabelle 5.2:** Einzelwellen - Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung

Elementarwelle	$ H(\omega_0) $ für Gitter 2				
	exp. Datenreihe	<i>PISO</i> -Alg.		<i>SIMPLE</i> -Alg.	
		$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$
	[–]	[–]	[–]	[–]	[–]
1	1.018	0.9600	0.9611	0.9885	0.9972
2	0.995	0.9664	0.9661	1.0135	1.0094
3	1.018	0.9494	0.9528	1.0028	1.0117
4	0.916	0.8576	0.8633	0.9080	0.9200
5	0.742	0.7072	0.6939	0.7178	0.7111
6	0.474	0.4735	0.4628	0.4463	0.4378
7	0.247	0.2326	0.2300	0.2180	0.2178
8	0.027	0.0234	0.0278	0.0250	0.0294

**Tabelle 5.3:** Einzelwellen - Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung

In den Abbildungen B.9 bis B.40 sind die Diagramme der Einzelwellenberechnungen zu finden. Auf der Abszisse ist die Zeit in Sekunden angegeben und auf der Ordinate ist die Amplitude in Metern skizziert. Zusätzlich zur Amplitude ist für die Stampfbewegung der Stampfwinkel in Grad angegeben. Der rote Graph stellt das Eingangssignal dar. Der grüne Graph ist das Ausgangssignal unter Verwendung des *PISO*-Algorithmus und der blaue Graph ist das Ausgangssignal unter Verwendung des *SIMPLE*-Algorithmus. Beispielhaft soll die Abbildung B.10 für die Auswertung herangezogen werden. Zu erkennen ist, dass die *SIMPLE*-Simulation mit einer größeren Amplitude schwingt, als die *PISO*-Simulation. Dieses Verhalten ist auch den Tabellen 5.2 und 5.3 zu entnehmen. Beispielhaft wird für die Stampfbewegung und der konstanten Amplitude der *PISO*-Algorithmus mit dem *SIMPLE*-Algorithmus verglichen. Für die dritte Elementarwelle besitzt die dimensionslose Amplitude des *SIMPLE*-Algorithmus einen wesentlich größeren Wert (1.0028) als die des *PISO*-Algorithmus (0.9494). Weiterhin fällt auf, dass eine kleine Phasenverschiebung zwischen dem *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus zu finden ist. Dies hängt mit der Anzahl der äußeren Iterationen des *SIMPLE*-Algorithmus zusammen. Untersuchungen haben ergeben, dass durch das Anheben der äußeren Iterationen auf insgesamt fünf bis sechs, die Phasenverschiebung null beträgt. Da die Phasenverschiebung für die Ermittlung der Tauch- und Stampfbewegung jedoch belanglos ist, konnten auch die übrigen Simulationen mit einer Anzahl von vier äußeren Iterationen vollzogen werden. Für einige Diagramme sind die Simulationen nicht bis 100 Sekunden berechnet worden, da sich bereits ein konstantes Bewegungsverhalten eingestellt hat um eine Auswertung der Amplitude durchzuführen und die frei gewordenen Ressourcen für neue Simulationen genutzt werden konnten.

Im Abschnitt 5.2 ist bereits kurz auf die prozentuale Abweichung der einzelnen Gitter eingegangen worden, um zu klären, welches Gitter für die nachfolgenden

Simulationen verwendet werden soll. Die Tabellen A.11 und A.12 beschreiben die Abweichungen der Simulationen zur experimentellen Datenreihe für die Tauch- und Stampfbewegung in Prozent. Für die Berechnung mit der konstanten Amplitude von  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$  und dem *PISO*-Algorithmus sind Abweichungen mit bis zu 25.637% für die Tauchbewegung zu groß. Die Werte der Simulation mit dem ersten Amplitudenverhältnis fallen wesentlich besser aus. Es gibt unter den acht Berechnungen nur einen Wert (fünfte Elementarwelle) der relativ zu große Abweichung hat. Alle anderen Werte liegen unter 10% Abweichung. Der Unterschied der Stampfbewegung ist schon für die Berechnung mit konstanter Amplitude sehr gering, bis auf einen Ausreißer mit 15.166% Abweichung. Die Ergebnisse für den *SIMPLE*-Algorithmus verhalten sich ähnlich. Jedoch liegen für die Simulationen mit dem ersten Amplitudenverhältnis mehrere Werte deutlich über einer Abweichung von 10%. Die Werte für die Stampfbewegung werden besser abgeschätzt und befinden sich bis auf eine Ausnahme unter 10%.

Die Übertragungsfunktionen  $|H(\omega_0)|$  können über die Kreisfrequenz  $\omega_0$  aufgetragen werden. Es ergibt sich jeweils eine Darstellungen für die Tauch- und Stampfbewegung mit fünf Graphen (Abbildung 5.1 und 5.2). Der blaue und türkise Graph sind mit dem *SIMPLE*-Algorithmus und konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis gerechnet. Auf der Ordinate ist die Übertragungsfunktion und auf der Abszisse ist die Wellenkreisfrequenz aufgetragen.

Die Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung wird in der Simulation leicht überschätzt. Die Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung hingegen wird leicht unterschätzt. Die Abweichungen der Simulation von der Übertragungsfunktion der experimentellen Datenreihe kann den Tabellen A.1 bis A.4 entnommen werden. Über die Auswertung der experimentellen Datenreihe sind keine spezifischen Informationen bekannt. Es ist nicht bekannt, wie die Auswertung für die einzelnen Antwortamplituden erfolgte. Es kann sein, dass nur die kleinste oder größte auftretende Amplitude ausgewertet worden ist. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass ein statistisches Mittel für alle Amplituden erstellt worden ist. In den Einzelwellensimulationen sind je ein Mittelwert für die Tauch- und Stampfbewegung mit konstanter Erregeramplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis über alle auftretenden Antwortamplituden erstellt worden. Aufgrund der Tatsache, dass über die Auswertung der experimentellen Daten keine Informationen vorhanden sind, sollten die Differenzen zwischen experimentellen Daten und den Daten aus den Simulationen skeptisch betrachtet werden. Um jedoch eine Vergleichsgrundlage zu erhalten, wird angenommen, dass die experimentellen Daten aus dem statistischen Mittel berechnet worden sind. Der Bereich der Abweichung ist aber klein genug um zu überprüfen, ob mit Seegangssimulationen ähnliche oder bessere Ergebnisse mit einem geringeren Ressourcenaufwand möglich sind.

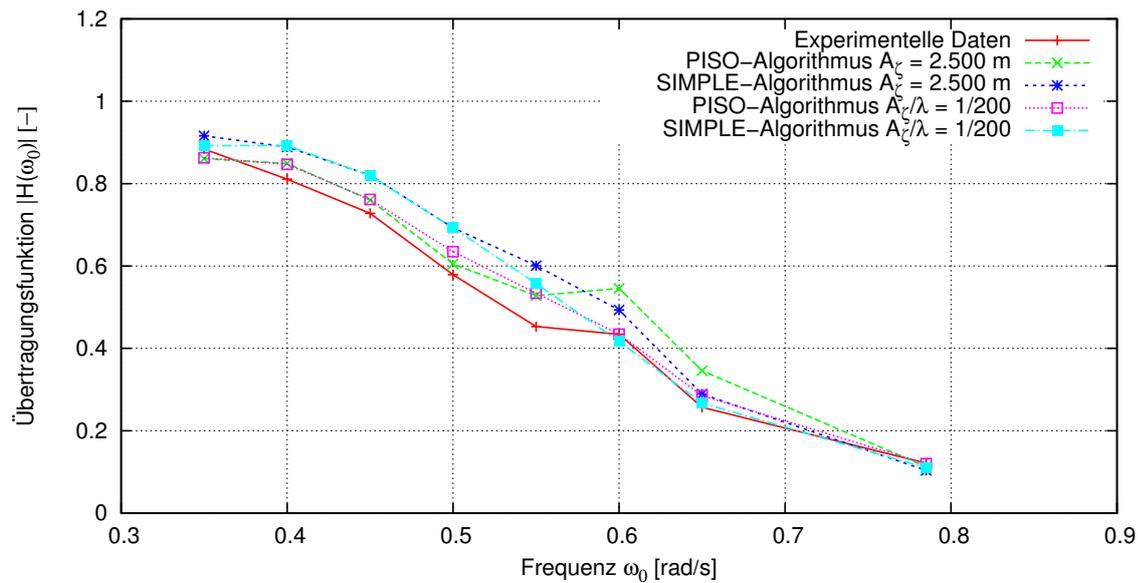


Abbildung 5.1: Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung

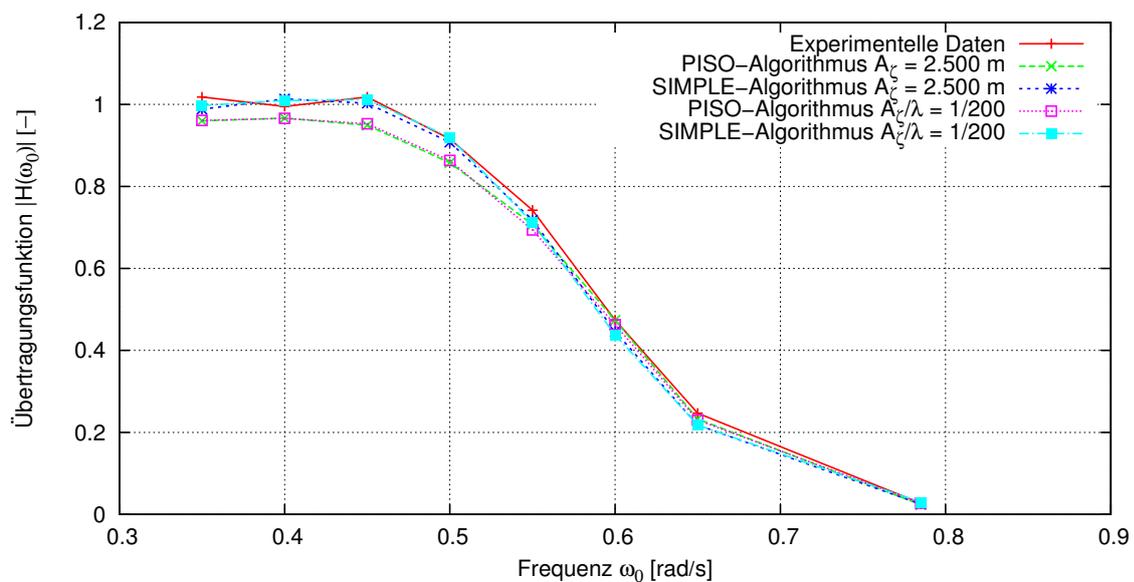


Abbildung 5.2: Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung

### 5.3.1 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Einzelwellensimulationen ist die Grundlage für die Seegangssimulationen geschaffen worden. Es konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse des *PISO*- als auch des *SIMPLE*-Algorithmus eine ausreichende Genauigkeit haben. Es ist bereits ein Unterschied zwischen der Simulation mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis festgestellt worden. Die Simulationen mit einem festgelegten Amplitudenverhältnis zeigen eine geringere Abweichung als die mit einer festen Amplitude. Es bleibt zu prüfen, welchen Einfluss die Amplitude auf die allgemeine Genauigkeit der Simulation hat.

## 5.4 Wellenspektren

### 5.4.1 Konstante Amplitude und erstes Amplitudenverhältnis

Die Auswertung einer Seegangssimulation beinhaltet ein umfangreiches Postprocessing der Datenreihen. Wird eine Fourier-Transformation für die rohen Datenreihen aus den Simulationen vollzogen, erhält man unzureichende Ergebnisse. Dies liegt daran, da die Zeitschritte der Datenreihe nicht äquidistant verteilt sind und in den ersten Sekunden der Simulation die Initialisierung stattfindet. Die diskrete Fourier-Transformation benötigt gleichverteilte Zeitschritte und ein gültiges Abtasttheorem. Dies bedeutet, dass für jede Wellenkomponente in dem Spektrum ein eigenes Abtasttheorem aufgestellt werden muss. Daraus ergibt sich für jede Wellenkomponente folgende Prozedur:

Zunächst muss die Begegnungsfrequenz für jede Wellenfrequenz nach Gleichung (2.17) ermittelt werden. Aus der Begegnungsfrequenz wird die Begegnungsperiode nach Gleichung (2.10) errechnet. Mit Hilfe der Begegnungsperiode kann eine neue Zeitreihe bestimmt werden, die ihren maximalen Wert als ein ganzzahliges Vielfaches der Begegnungsperiode besitzt. Diese neue Zeitreihe ist das gültige Abtasttheorem für die Fourier-Transformation, da die gesuchte Begegnungsfrequenz und ein Vielfaches dieser enthalten ist. Um Initialisierungsfehler ausschließen zu können, werden Daten aus einem vorgegebenem Anfangsintervall nicht berücksichtigt. Da auch die neue Zeitreihe noch nicht äquidistant verteilt ist, muss dies als nächstes geschehen. Zusätzlich wird im Rahmen der äquidistanten Umverteilung der Zeitschritte die auszuwertende Datenreihe der Bewegung für die neue Zeitreihe linear interpoliert.

Die neuen Datenreihen erfüllen nun die erforderlichen Kriterien für eine diskrete Fourier-Transformation: gültiges Abtasttheorem, äquidistante Verteilung der Zeitschritte und Ausschluss der Initialisierungsfehler. Für die gesuchte Begegnungsfrequenz kann der Wert der Bewegung aus der Datenreihe der Fourier-Transformation direkt entnommen werden. Um das Postprocessing so einfach wie möglich zu gestalten, ist der oben genannte Prozess in ein *Python*-Programm eingebunden, welches noch zusätzliche Optionen bietet. Zu diesen Optionen zählt zum Beispiel, dass die Übertragungsfunktion aller Wellenkomponenten dimensionslos oder dimensionsbehaftet in eine Datei ausgegeben werden kann. Das geschieht mit dem Ziel eine sofortige Auswertung der Simulation durchführen zu können.

Die Ergebnisse aus den Seegangssimulationen sollen zuallererst mit den Ergebnissen aus den Einzelwellensimulationen verglichen werden, um eine direkte Gegenüberstellung zu erhalten. Die Tabellen 5.4 und 5.5 beinhalten die Werte der Übertragungsfunktionen für die Tauch- und Stampfbewegung der Seegangssimulationen, sowie die experimentellen Datenreihen. Die Spalten *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus umfassen die Simulationen mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis.

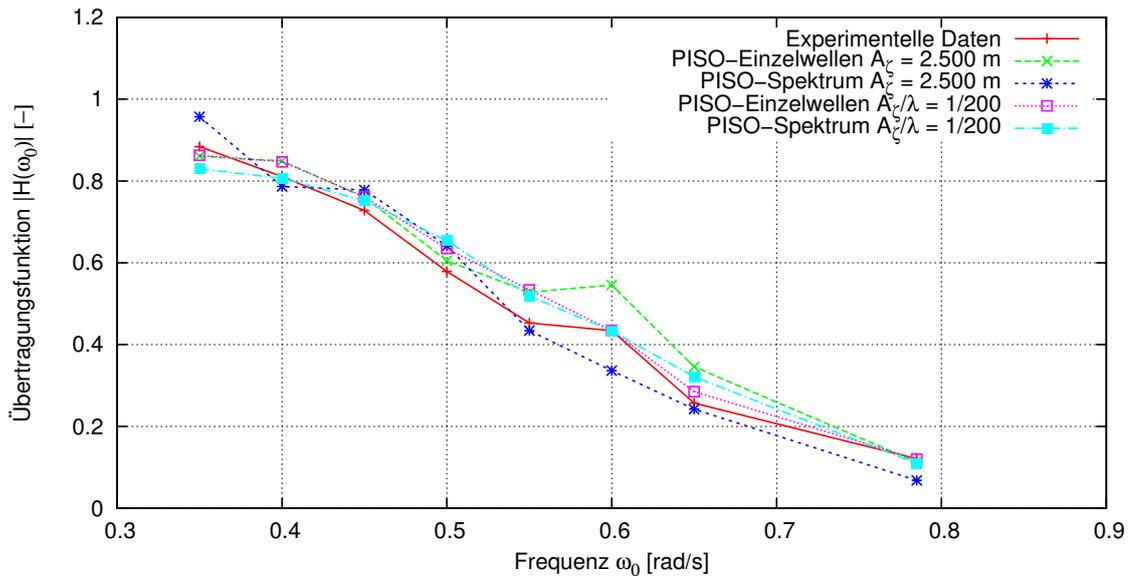
Elementarwelle	$ H(\omega_0) $ für Gitter 2				
	exp. Datenreihe	PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.	
		$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$
	[–]	[–]	[–]	[–]	[–]
1	0.884	0.9570	0.8297	0.9591	0.8559
2	0.811	0.7865	0.8064	0.8988	0.8589
3	0.728	0.7781	0.7519	0.9187	0.8274
4	0.579	0.6412	0.6539	0.7385	0.7402
5	0.453	0.4342	0.5192	0.6431	0.5847
6	0.434	0.3362	0.4331	0.3318	0.4386
7	0.257	0.2422	0.3211	0.2051	0.3018
8	0.121	0.0682	0.1091	0.0498	0.0720

**Tabelle 5.4:** Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung

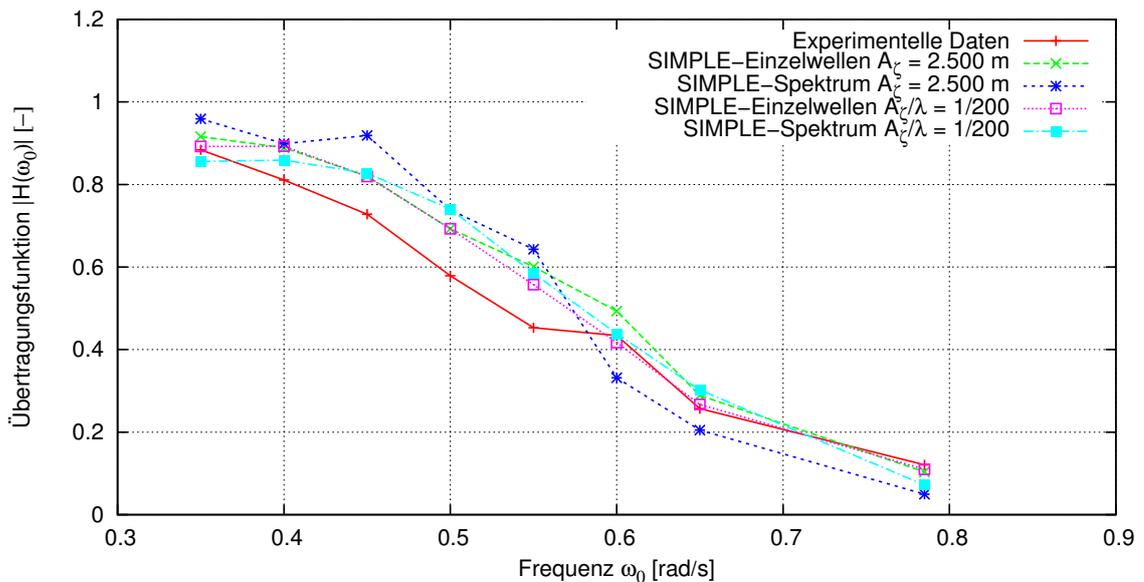
Elementarwelle	$ H(\omega_0) $ für Gitter 2				
	exp. Datenreihe	PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.	
		$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$
	[–]	[–]	[–]	[–]	[–]
1	1.018	1.1068	0.9066	1.0359	0.9377
2	0.995	0.9618	0.9511	0.9329	1.0034
3	1.018	0.8875	0.9772	0.9237	1.0387
4	0.916	0.6785	0.8097	0.6706	0.8715
5	0.742	0.5336	0.6564	0.5559	0.6712
6	0.474	0.3200	0.4502	0.2634	0.4330
7	0.247	0.1702	0.2051	0.1263	0.1921
8	0.027	0.0387	0.0491	0.0317	0.0425

**Tabelle 5.5:** Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung

Aus den Datenreihen der Tabellen 5.4 und 5.5 lassen sich die Übertragungsfunktionen für die Tauch- und Stampfbewegung grafisch darstellen. Abbildung 5.3 und 5.4 zeigen die Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung mit dem *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus. Abbildung 5.5 und 5.6 stellen die Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung dar. Die Bezeichnung  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$  deklariert Berechnungen mit konstanter Amplitude und  $A_\zeta/\lambda = 1/200$  mit dem ersten Amplitudenverhältnis.



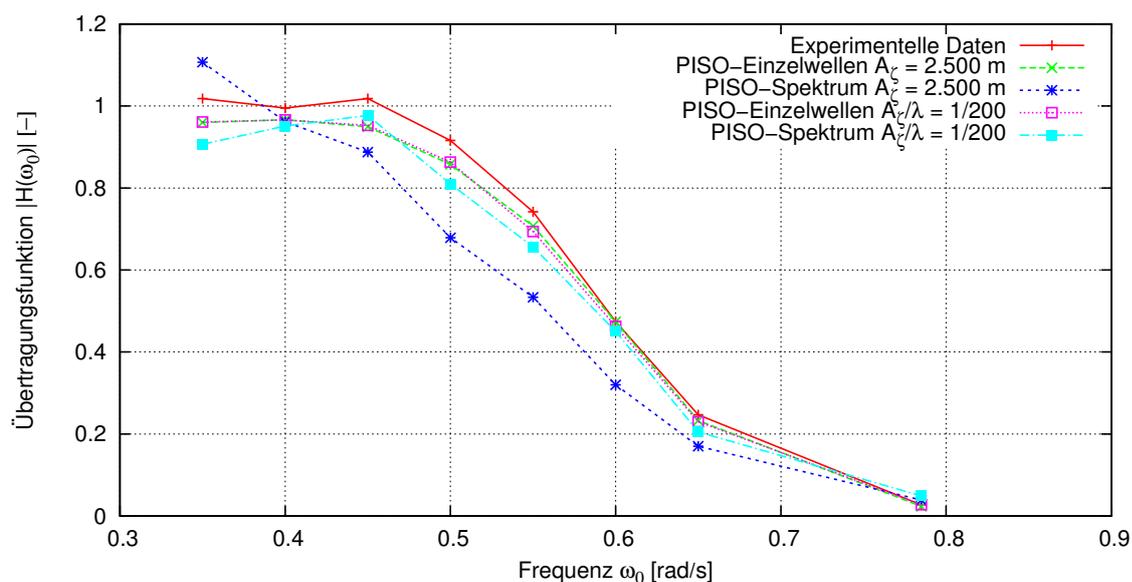
**Abbildung 5.3:** Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung mit *PISO*-Algorithmus



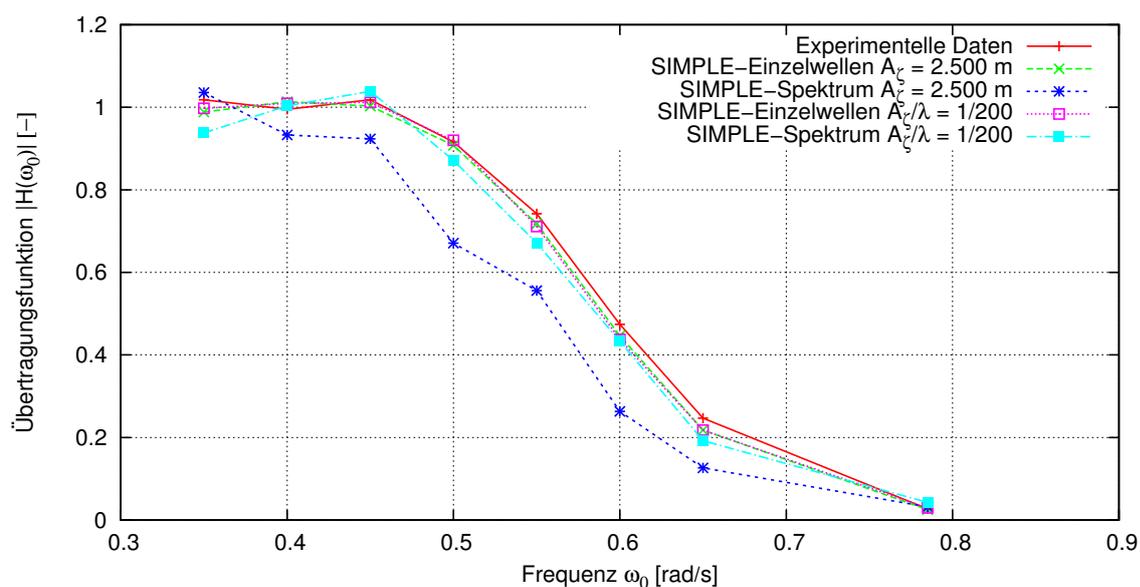
**Abbildung 5.4:** Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung mit *SIMPLE*-Algorithmus

In Abbildung 5.3 ist zu erkennen, dass die *PISO*-Einzelwellen- und die *PISO*-Seegangssimulation mit konstanter Amplitude die größten Abweichungen zur experimentellen Datenreihe aufweisen. Die Simulationen mit dem *SIMPLE*-Algorithmus zeigen in Abbildung 5.4 noch größere Abweichungen. Als Begründung für die höhere Abweichung ist anzunehmen, dass das nicht-lineare Verhältnis der Schiffsbewegung zur Oberflächenauslenkung des Wassers ausschlaggebend ist. Wesentlich stärker fällt dieser Aspekt für die Berechnung mit Wellenspektren und konstanter Amplitude aus, da nach Gleichung (2.18) die Einzelwellen linear addiert werden. Die Berechnungen mit dem ersten Amplitudenverhältnis zeigen sowohl für die *PISO*-Simulation (türkiser Graph) in Abbildung 5.3 wie auch für die *SIMPLE*-Simulation (türkiser Graph) in Abbildung 5.4

die geringsten Abweichungen zu den Einzelwellensimulationen.



**Abbildung 5.5:** Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung mit *PISO*-Algorithmus



**Abbildung 5.6:** Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung mit *SIMPLE*-Algorithmus

Die Werte für die Stampfbewegung haben eine wesentlich kleinere Abweichung, als die der Tauchbewegungen. Doch auch hier weisen die Simulationen mit konstanter Amplitude den größten Unterschied auf, sowohl mit dem *PISO*- als auch mit dem *SIMPLE*-Algorithmus.

In den Tabellen A.13 und A.14 ist die prozentuale Abweichung der Ergebnisse der Wellenspektren mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis zu den Einzelwellensimulationen aufgelistet. Zu erkennen ist,

dass die Seegangssimulationen mit dem ersten Amplitudenverhältnis einen wesentlich kleinere Abweichung für die Tauch- und Stampfbewegung mit dem *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus aufweisen als für die Seegangssimulation mit konstanter Amplitude. Für die Berechnung der Tauchbewegung mittels des *PISO*-Algorithmus ist eine maximale Abweichungen von 17.71% (siebte Elementarwelle) und 10% (achte Elementarwelle) zu erkennen. Dies gilt für die Wellenkomponenten mit den kleinsten Amplituden. Ähnliches ist für den *SIMPLE*-Algorithmus für die beiden letzten Wellenkomponenten zu erkennen. Die Abweichungen für die Stampfbewegung sind im Durchschnitt sogar kleiner als die für die Tauchbewegung. Die beiden letzten Wellenkomponenten weichen am stärksten von den Einzelwellensimulationen ab. Die Seegangssimulationen mit konstanter Amplitude weisen eine zu große Abweichung auf.

Aus den Tabellen A.15 und A.16 ist die prozentuale Abweichung der Seegangssimulationen mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis zur experimentellen Datenreihe zu entnehmen. Die bereits visuell festgestellten Ergebnisse aus den Diagrammen werden durch die Werte aus beiden Tabellen noch verdeutlicht. Für die Tauchbewegung weichen die Simulationen mit dem *SIMPLE*-Algorithmus um bis zu 142.97% zu den experimentellen Daten ab. Für die komplette Berechnung sind Abweichungen von 7.83 – 30.80% zu viel um ein akzeptables Ergebnis zu erzielen. Der *PISO*-Algorithmus weist zwar geringere Abweichungen als der *SIMPLE*-Algorithmus auf, jedoch liegt der größte Fehler bei 77.42%. Die Simulationen mit einem festgelegtem Amplitudenverhältnis fallen sehr viel besser aus. Der größte Fehler für den *SIMPLE*-Algorithmus liegt bei 68.08% (achte Elementarwelle) und auch im Durchschnitt fallen die Abweichung kleiner aus. 25.30% (siebte Elementarwelle) als größter Fehler des *PISO*-Algorithmus und im Schnitt Abweichungen 0.57 – 12.75% sind numerisch vertretbar.

Die Abweichungen zur experimentellen Datenreihe für die Stampfbewegung verhalten sich ähnlich zu denen der Tauchbewegung. Bei konstanter Amplitude und unter Verwendung des *SIMPLE*-Algorithmus beträgt der größte Fehler 96.03%. Unter Verwendung des *PISO*-Algorithmus ergibt sich der größte Fehler zu 48.17%. Im Vergleich beläuft sich die größte Abweichung für die Simulation mit dem ersten Amplitudenverhältnis auf 44.89% für den *PISO*-Algorithmus und nur 36.47% für den *SIMPLE*-Algorithmus. Zu erkennen ist auch, dass die Abweichungen für alle Wellenkomponenten wesentlich geringer für das erste Amplitudenverhältnis als für die konstante Amplitude ausfallen.

Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe eines Seegangsspektrums sehr ähnliche Ergebnisse wie mit Einzelwellensimulation erzeugt werden können. Die Amplitude der Wellenkomponenten hat einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation. Die Form des Spektrum hat einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation.

Ein wichtiges Entscheidungskriterium für den Erfolg einer Seegangssimulation ist die Prozessorzeit. Sie sollte bedeutend kleiner ausfallen als die Summe der Prozessorzeiten der Einzelwellensimulationen. In den Tabellen A.9 und A.10 sind die Prozessorzeiten der Einzelwellenrechnungen aufgeführt. Um einen Vergleichswert zu den Seegangssimulationen zu erhalten, werden die Prozessorzeiten für jede Einzelwellensimulation aufsummiert. Zu erwarten ist, dass die Seegangssimulationen eine höhere Prozessorzeit besitzen als die Einzelwellensimulationen, da durch die größere Anzahl an Zellen der numerische Aufwand steigt. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass nur ein Bruchteil an Prozessoren nötig ist um eine Bewegungsantwort des Schiffes auf alle acht Wellenkomponenten zu erhalten. Den Tabellen 5.6 und 5.8 sind die aufsummierten Prozessorzeiten für die Einzelwellensimulationen und die Prozessorzeiten für die Seegangssimulationen zu entnehmen. Die Prozessorzeiten berechnen sich nach Gleichung (5.1). Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Prozessorzeiten für die Wellenspektren kleiner ausfallen als die der Einzelwellen. Im Falle des *SIMPLE*-Algorithmus kann ungefähr 80% Prozessorzeit gegenüber dem *PISO*-Algorithmus eingespart werden, sowohl für die konstante Amplitude als auch für das erste Amplitudenverhältnis. Der *PISO*-Algorithmus kann für die Simulationen mit dem ersten Amplitudenverhältnis sogar 1625.1 Prozessorstunden einsparen. Das Einsparpotenzial für den Fall der konstanten Amplitude ist nur gering, eine Kürzung von lediglich 200 Prozessorstunden liegt vor. Werden Simulationen mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis untereinander verglichen, so kann festgestellt werden, dass die Prozessorzeiten der konstanten Amplitude erheblich größer sind.

$\Sigma$ Prozessorzeit [h]		Prozessorzeit [h]	
Einzelwellen		Wellenspektrum	
<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.	<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.
5054	3703	4856	2740

**Tabelle 5.6:** Gegenüberstellung der Prozessorzeit für  $A_\zeta = 2.5 m$

$\Sigma$ Prozessorzeit [h]		Prozessorzeit [h]	
Einzelwellen		Wellenspektrum	
<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.	<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.
4498	2545	2873	1587

**Tabelle 5.7:** Gegenüberstellung der Prozessorzeit für  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

## 5.4.2 Zusammenfassung

Schon die Simulationen mit Einzelwellen haben gezeigt, dass sich die Genauigkeit der Seegangssimulationen mit einem konstanten Amplitudenverhältnis

im Vergleich zu Seegangssimulationen mit konstanter Amplitude verbessert. Die Prozessorzeiten verringern sich im Vergleich zu den Einzelwellensimulationen drastisch. Der Unterschied zwischen den Prozessorzeiten der Seegangssimulationen mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis ist deutlich. Auch für die Seegangssimulationen zeigt sich, dass die Wahl der Amplitude einen direkten Einfluss auf die Simulation hat.

### 5.4.3 Zweites bis fünftes Amplitudenverhältnis

Es ist zu überprüfen, welchen Einfluss die Höhe des Spektrums auf die Seegangssimulation hat. Es konnte bereits ein Einfluss der Amplitude auf die Genauigkeit der Berechnung, sowie auf die Prozessorzeit registriert werden. Für die folgenden Simulationen ist das Amplitudenverhältnis nach Tabelle 3.8 variiert worden. Für den *PISO*-Algorithmus sind das erste und das zweite Amplitudenverhältnis und für den *SIMPLE*-Algorithmus sind die Amplitudenverhältnisse zwei bis fünf berechnet worden. Die Tabellen 5.9 und 5.10 beinhalten die Übertragungsfunktionen für die fünf extra Rechnungen. Aus zeitlichen- und ressourcentechnischen Gründen konnte nicht alle Amplitudenverhältnisse für beide Algorithmen berechnet werden. Alle drei Simulationen mit dem *SIMPLE*-Algorithmus liegen sehr dicht beieinander.

In den Tabellen A.17 und A.18 sind die prozentualen Abweichungen der zusätzlichen Simulationen zu den Einzelwellensimulationen aufgeführt. Die Abweichungen des *SIMPLE*-Algorithmus beziehen sich auf die Übertragungsfunktion der Einzelwellensimulation mit dem *SIMPLE*-Algorithmus und dem ersten Amplitudenverhältnis. Dementsprechend wird der *PISO*-Algorithmus mit der Übertragungsfunktion des *PISO*-Algorithmus der Einzelwellensimulation und dem ersten Amplitudenverhältnis verglichen. Die Abweichungen unter den einzelnen Amplitudenverhältnissen sind so gering, dass nur eine Simulation herausgegriffen werden muss. Beispielhaft wird die Simulation mit  $A_\zeta/\lambda = 1/350$  betrachtet. Die maximale Abweichung für die Tauchbewegung beträgt 10.27% und für die Stampfbewegung 10.53%. Zur Erinnerung: Die maximalen Abweichungen der Tauchbewegung für das erste Amplitudenverhältnis beliefen sich auf 52.78% und 11.43% und für die Stampfbewegung auf 30.82% und 13.38% (Tabellen A.13 und A.14). Die Seegangssimulation mit dem *PISO*-Algorithmus und dem Amplitudenverhältnis von  $A_\zeta/\lambda = 1/300$  weisen eine höhere Genauigkeit zu den Einzelwellensimulationen auf, als die Seegangssimulationen mit dem *SIMPLE*-Algorithmus. Für die Tauchbewegung liegen alle Abweichungen unter 10% und teilweise sogar unter 1%. Im Vergleich liegt die größte Abweichung der Seegangssimulation mit dem Amplitudenverhältnis von  $A_\zeta/\lambda = 1/200$  bei 17.71%. Auch sind die Abweichungen für die Stampfbewegung geringer geworden. Die größte Abweichung liegt nur noch bei 15.63%, vorher lag sie bei 43.38% für die selbe Wellenkomponente. Die Abweichungen der einzelnen Amplitudenverhältnisse ist so gering, dass es ausreicht alle Seegangssimulationen in

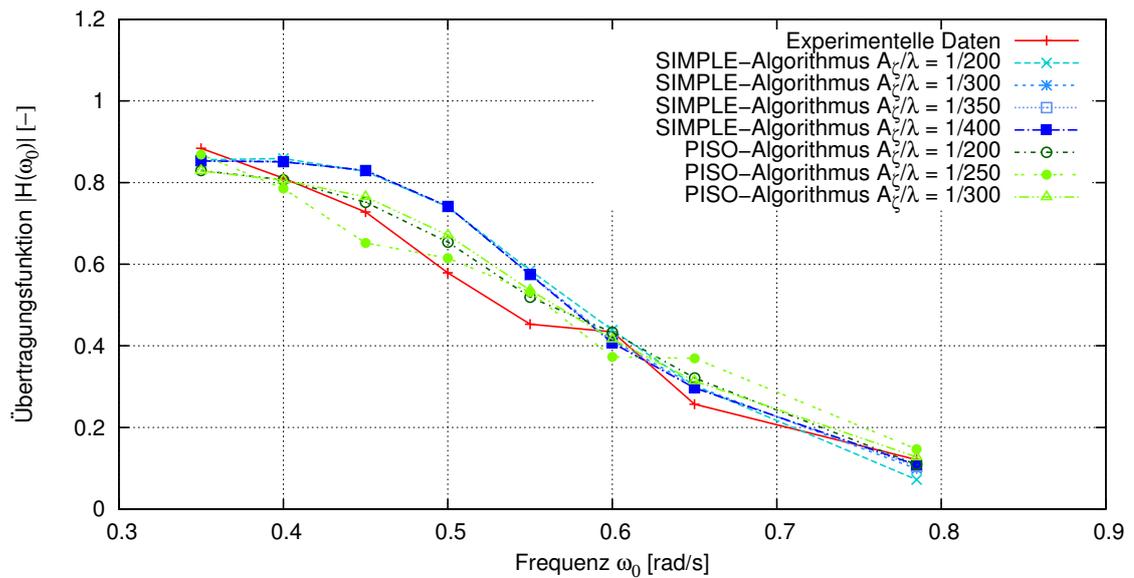
einem Graphen darzustellen. Abbildung 5.7 und 5.8 stellen die Übertragungsfunktionen für alle Seegangssimulationen mit den verschiedenen Amplitudenverhältnissen dar. Der rote Graph bildet die experimentelle Datenreihe ab. Alle *PISO*-Simulationen sind in Grüntönen und alle *SIMPLE*-Simulationen sind in Blautönen dargestellt. Aus den Graphen ist noch deutlicher zu erkennen, dass die Abweichungen sehr gering sind und dass ab einem gewissen Amplitudenverhältnis die Abweichung nicht mehr zu- bzw. abnimmt.

Aus den Tabellen A.19 und A.20 ist die prozentuale Abweichung zu den experimentellen Datenreihen abzulesen. Die Tauchbewegung wird, wie bei der Einzelwellensimulation, für den *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus leicht überschätzt und die Stampfbewegung leicht unterschätzt. Die Abweichungen für die Stampfbewegung liegen bis auf einen Ausreißer, der bei ca. 24% liegt, in einem sehr guten Bereich. Die restlichen Werte liegen alle unter 10% und teilweise bei nur 2 - 3%. Die Verbesserung zur Simulation mit dem ersten Amplitudenverhältnis und dem *SIMPLE*-Algorithmus sind eindeutig. Ein Ausreißer konnte eliminiert und die allgemeine Genauigkeit konnte gesteigert werden. Die Genauigkeit der Tauchbewegung konnte ebenfalls verbessert werden, auch wenn zwei Simulationen eine Abweichung von ca 20% besitzen. Der größte Ausreißer von 68% konnte entfernt und die allgemeine Genauigkeit gesteigert werden.

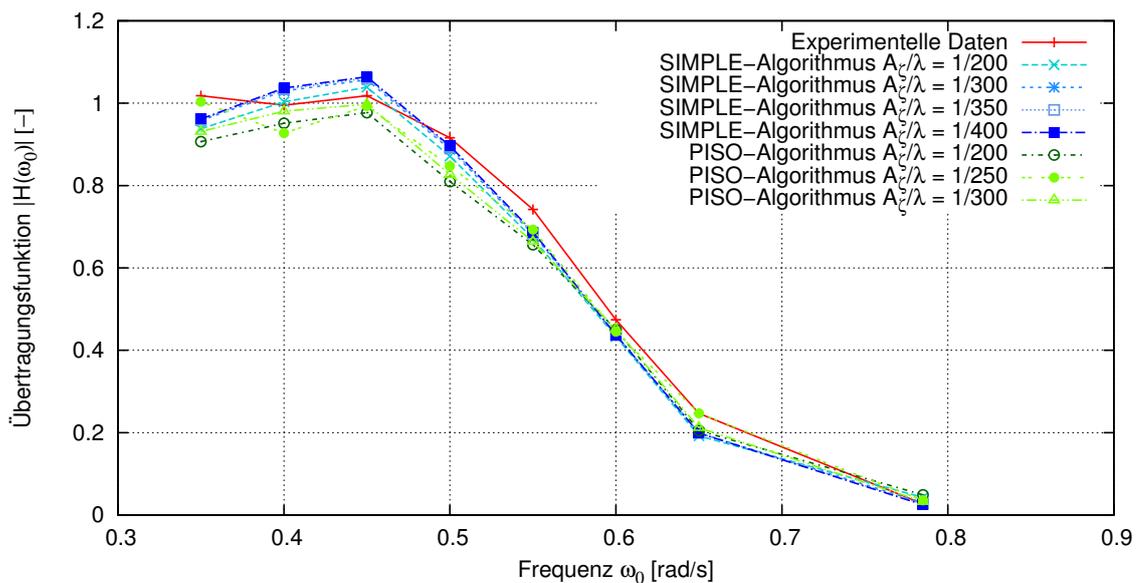
In Tabelle 5.8 sind die Prozessorzeiten der Seegangssimulationen mit den verschiedenen Amplitudenverhältnissen aufgelistet. Die Prozessorzeit liegt ungefähr im Bereich des ersten Amplitudenverhältnisses. Sie sind zwar 100 bis 200 Prozessorstunden höher, jedoch kann diese Diskrepanz auch auf Überlastungen des Cluster zurückzuführen sein, da sich die Anzahl der Iterationen für jeden Zeitschritt im Schnitt nicht geändert hat. Dies gilt ebenfalls für die Seegangssimulationen mit dem *PISO*-Algorithmus. Die allgemeinen Abweichungen für den *PISO*-Algorithmus zu den experimentellen Daten sind für die Tauchbewegung kleiner, jedoch für die Stampfbewegung etwas größer. Sie liegen in einem Bereich, der aufgrund des Informationsmangels bezüglich der Auswertung der experimentellen Daten ausreichend genau ist. Wichtiger ist der oben aufgeführte Vergleich zu den Einzelwellensimulationen.

Prozessorzeit [h]				
<i>PISO</i> -Alg.		<i>SIMPLE</i> -Alg.		
$A_{\zeta}/\lambda = 1/250$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/300$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/300$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/350$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/400$
2912	3088	1773	1648	1640

**Tabelle 5.8:** Gegenüberstellung der Prozessorzeit für vd. Amplitudenverhältnisse



**Abbildung 5.7:** Übertragungsfunktionen der Tauchbewegung für verschiedene Amplitudenverhältnisse



**Abbildung 5.8:** Übertragungsfunktionen der Stampfbewegung für verschiedene Amplitudenverhältnisse

#### 5.4.4 Zusammenfassung

Die Variation des Amplitudenverhältnisse der Seegangssimulationen konnte eine Verbesserung der Ergebnisse im Vergleich zu den Einzelwellensimulationen mit sich bringen. Die prozentualen Abweichungen der Tauch- und Stampfbewegung konnte für den *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus verringert werden. Es war eine minimale Erhöhung der Prozessorzeiten für beide Lösungsalgorithmen zu vermerken.

Elementarwelle	$ H(\omega_0) $ für Gitter 2					
	exp. Datenreihe	PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.		
		$A_\xi/\lambda = 1/250$	$A_\xi/\lambda = 1/300$	$A_\xi/\lambda = 1/300$	$A_\xi/\lambda = 1/350$	$A_\xi/\lambda = 1/400$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0.884	0.8685	0.8286	0.8530	0.8531	0.8529
2	0.811	0.7855	0.8057	0.8522	0.8511	0.8506
3	0.728	0.6519	0.7651	0.8283	0.8294	0.8299
4	0.579	0.6150	0.6712	0.7411	0.7415	0.7418
5	0.453	0.5320	0.5362	0.5759	0.5741	0.5741
6	0.434	0.3726	0.4161	0.4136	0.4092	0.4073
7	0.257	0.369	0.3137	0.3020	0.2979	0.2970
8	0.121	0.1467	0.1276	0.0985	0.1046	0.1080

**Tabelle 5.9:** Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Tauchbewegung mit unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen

Elementarwelle	$ H(\omega_0) $ für Gitter 2					
	exp. Datenreihe	PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.		
		$A_\xi/\lambda = 1/250$	$A_\xi/\lambda = 1/300$	$A_\xi/\lambda = 1/300$	$A_\xi/\lambda = 1/350$	$A_\xi/\lambda = 1/400$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1.018	1.0038	0.9313	0.9577	0.9597	0.9613
2	0.995	0.9274	0.9807	1.0296	1.0337	1.0367
3	1.018	0.9932	0.9975	1.0569	1.0612	1.0643
4	0.916	0.8473	0.8270	0.8882	0.8928	0.8966
5	0.742	0.6930	0.6643	0.6822	0.6846	0.6876
6	0.474	0.4450	0.4508	0.4368	0.4369	0.4374
7	0.247	0.2468	0.2122	0.1997	0.1992	0.1991
8	0.027	0.0356	0.0324	0.0298	0.0266	0.0246

**Tabelle 5.10:** Wellenspektrum - Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung mit unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen

## 5.5 Einfluss der Volumenkräfte

Im Rahmen dieser Bachelorthesis soll getestet werden, welchen Einfluss der Bereich der wirkenden Volumenkräfte auf die Simulation hat. Grundsätzlich werden die Volumenkräfte in Seegangssimulationen eingesetzt um das Berechnungsgebiet so klein wie möglich zu halten, damit der numerischen Aufwand reduziert werden kann. Dadurch werden Fehler, wie die Reflektion der erzeugten Wellen vom Berechnungsrand zurück ins Berechnungsgebiet und unphysikalische Störwellen, die durch die Initialisierung entstehen, gedämpft, sodass die Simulationen schnell einen stabilen Zustand erreicht. Die Volumenkräfte werden in einer Rampenfunktion zwischen zwei fest definierten Entfernungsparametern um das Schiff herum gestartet und werden während dieser Rampe auf eine einstellbare Intensität hochgefahren. Bei der Positionierung der Entfernungsparameter ist darauf zu achten, dass sie nicht zu nah an das Schiff gelegt werden, aber auch nicht zu weit entfernt. Im Falle der zu nahen Positionierung, greifen die Volumenkräfte zu stark in die Simulation ein. Dies ist damit zu erklären, dass um das Schiff Über- und Unterdruckgebiete entstehen, die wiederum das Geschwindigkeitsfeld beeinflussen. Da die Volumenkräfte mittels einer Geschwindigkeitsdifferenz arbeiten, würden sie im Falle der zu dicht gewählten Positionierung sehr stark die Geschwindigkeit auf die Initialisierungsgeschwindigkeit drücken bzw. heben. Ändert sich das Geschwindigkeitsfeld um das Schiff, ändert sich auch die Druckverteilung und dadurch die angreifenden Kräfte und Momente, die auf das Schiff wirken. Andere Kräfte und Momente bewirkt eine Änderung der Schiffsbewegung. Somit dürfen die Volumenkräfte nicht zu dicht an dem Schiff positioniert werden. Es muss auch darauf geachtet werden, dass der oberste Entfernungsparameter innerhalb des Berechnungsgebietes liegt, denn erst ab diesem Wert arbeiten die Volumenkräfte mit der gesamten vorgegebenen Intensität. Liegt der Berechnungsrand jedoch innerhalb der Rampe, so kann es passieren, dass Fehler nicht weggedämpft werden können und somit die Simulation beträchtlich beeinflussen. Der numerische Strand ist bei allen Simulationen, sowohl den Einzelwellensimulationen und den Seegangssimulationen,  $0,6 \cdot L_{pp}$  hinter dem Schiff gestartet worden. Das volle Potenzial ist bei  $0,9 \cdot L_{pp}$  hinter dem Schiff aktiviert worden. Der numerische Strand hat mit diesen Einstellungen keinen Einfluss auf die Schiffsbewegungen.

Die Länge  $L_{pp}$  des Schiffes beläuft sich auf  $173 \text{ m}$ , die Breite auf  $B = 26 \text{ m}$  und der äußere Rand des Berechnungsgebietes  $y_{max}$  liegt bei  $190 \text{ m}$ . Der maximale Entfernungsparameter der Rampe sollten innerhalb des Berechnungsgebietes liegen. Alle vorherigen Simulationen sind mit konservativen Einstellungen vorgenommen worden. Der minimale Wert der Rampe liegt bei  $0,45 \cdot L_{pp}$  und der maximale Wert  $0,9 \cdot L_{pp}$ . Eine Entfernung von  $0,45 \cdot L_{pp} \text{ m}$  für den Start der Rampenfunktion ist weit genug entfernt um die Schiffsbewegung nicht zu beeinflussen und der Endwert ist so gewählt, dass zum Beispiel Störwellen gedämpft werden können. Die Distanz zwischen  $min_{Dist}$  und  $max_{Dist}$  ist so groß, dass die Rampe langsam hochfahren kann und nicht mit zu

stark steigender Intensität in die Simulation eingreift. Die Intensität der Volumenkräfte wird dabei nicht verändert. Die ersten Berechnungen mit veränderten Volumenkräfte sind mit  $0.2 \cdot L_{pp}$  und  $0.3 \cdot L_{pp}$  durchgeführt worden. Die Simulation ist nach einer Simulationszeit von ca. 10 Sekunden automatisch abgebrochen worden. Der Grund ist das starke Eingreifen in das unmittelbare Strömungsfeld des Schiffes. Dadurch ist es zu einer Entkopplung des Druck-Geschwindigkeits-Feldes gekommen und die Iterationen sind durch einen Begrenzer (maximale Anzahl der Iterationen = 1000) beendet worden. Diese Einstellung ist jeweils für den *PISO*- und *SIMPLE*-Algorithmus mit konstanter Amplitude und dem ersten Amplitudenverhältnis durchgeführt worden. Die Simulationen mit konstanter Amplitude sind noch früher abgebrochen worden als die Simulationen mit dem ersten Amplitudenverhältnis.

Für die nächsten Einstellungen muss also gewährleistet sein, dass  $min_{Dist}$  weit genug vom Schiff entfernt ist um eine Beeinflussung des schiffsnahen Strömungsfeldes zu verhindern.  $max_{Dist}$  wird näher an  $min_{Dist}$  verschoben, damit geprüft werden kann, welchen Einfluss die Länge zwischen beiden Entfernungsparemtern auf die Simulationszeit und Simulationsgenauigkeit hat. Unter Berücksichtigung dessen ist  $min_{Dist}$  mit einem Wert von  $0.3 \cdot L_{pp}$  und  $0.45 \cdot L_{pp}$  gewählt worden.

Den Tabellen 5.12 und 5.13 sind die Übertragungsfunktionen und die prozentualen Abweichungen zu den experimentellen Daten und zu den Einzelwellensimulationen zu entnehmen. Für den *SIMPLE*-Algorithmus mit dem ersten Amplitudenverhältnis gibt es kaum eine Veränderung der Abweichung zu den experimentellen Daten. Die bereits aus den Tabellen A.15 und A.16 bekannten Abweichungen werden zum Vergleich betrachtet. Für die letzte Wellenkomponente ist eine Abweichung von 38.37% (Tauchbewegung) und 34.38% (Stampfbewegung) zur Übertragungsfunktion zu erkennen. Allerdings liegt das Ergebnis für die letzte Wellenkomponente wesentlich dichter an der Übertragungsfunktion der experimentellen Datenreihe. Die Prozessorzeit der Simulation mit den Volumenkräfte und dem *SIMPLE*-Algorithmus erhöht sich um ca. 460 Prozessorstunden. Der Zeitschritt ist im Durchschnitt (0.02 s) gleich geblieben, dafür hat sich die Anzahl der inneren Iterationen von ca. 25 auf 50 für die Drucklösung erhöht. Für die Simulation mit dem *SIMPLE*-Algorithmus muss gesagt werden, dass die Volumenkräfte keinen positiven Einfluss mit den oben genannten Einstellungen haben. Die Genauigkeit verändert sich kaum, jedoch erhöht sich die Prozessorzeit, da stärker in die Berechnung eingegriffen wird.

Die Simulationen mit dem *PISO*-Algorithmus, ebenfalls den Tabellen 5.12 und 5.13 zu entnehmen, sind mit einer konstanten Amplitude von  $A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$  berechnet worden. Es fällt auf, dass vor allem die Wellenkomponenten mit einer kleinen Wellenlänge eine große Abweichung zu den Einzelwellensimulationen als auch zu der experimentellen Datenreihen besitzen. Die Genauigkeit der *PISO*-Simulation verändert sich sichtbar. Zum einen kann es an der Simulation mit der konstanten Amplitude liegen oder an dem Lösungsalgorithmus selbst. Die Ergebnisse für die *SIMPLE*-

Simulation weichen nicht so stark ab. Die Prozessorzeit der *PISO*-Simulation erhöht sich um fast 1200 Prozessorstunden, was auf einen größeren Einfluss der Volumenkräfte auf die Strömung schließen lässt. Aus zeitlichen und ressourcentechnischen Gründen konnten leider keine neue Simulationen gestartet werden, die den Einfluss auf den Lösungsalgorithmus aufzeigen.

Prozessorzeit [h]	
<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.
$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$
6003	2039

**Tabelle 5.11:** Gegenüberstellung der Prozessorzeit für *Body Forces*

### 5.5.1 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Volumenkräfte einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Simulation haben. Die Prozessorzeiten haben sich für beide Lösungsalgorithmen erhöht. Die Einstellungen der Parameter  $min_{Dist}$  und  $max_{Dist}$  sind dabei ausschlaggebend. Greifen die Volumenkräfte zu nah am Schiff an, so werden die Schiffsbewegungen beeinflusst und das Ergebnis verfälscht. Daher muss gewährleistet werden, dass ein nötiger Abstand zum Schiff erhalten bleibt. Die Grundeinstellungen  $0.45 \cdot L_{pp}$  und  $0.9 \cdot L_{pp}$  haben diesen Abstand anscheinend repräsentiert. Die Untersuchung, ob sich die Simulationsergebnisse geändert hätten, wenn der Wert von  $min_{Dist}$  auf ca.  $0.6 \cdot L_{pp}$  erhöht worden wäre, lag leider nicht mehr im zeitlichen Rahmen dieser Bachelorthesis.

$ H(\omega_0) $ der Einzelwellen		$ H(\omega_0) $ der Wellenspektren		Abweichung der Wellenspektren in %	
PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$
[–]	[–]	[–]	[–]	$ H(\omega_0) $	$ H(\omega_0) $
				exp. Daten.	exp. Daten.
0.8604	0.8923	0.9115	0.8402	5.606	-6.201
0.8468	0.8925	0.7905	0.8415	-7.122	-6.061
0.7615	0.8193	0.7736	0.8206	1.564	0.158
0.6350	0.6926	0.6507	0.7487	2.413	7.493
0.5339	0.5574	0.5202	0.6167	-2.634	9.616
0.4346	0.4171	0.3121	0.4457	-39.25	6.412
0.2851	0.2673	0.2031	0.3014	-40.37	11.31
0.1200	0.1100	0.0844	0.0795	-42.18	-38.37
				-43.36	9.091

Tabelle 5.12: Wellenspektren mit *Body Forces* für die Tauchbewegung

$ H(\omega_0) $ der Einzelwellen		$ H(\omega_0) $ der Wellenspektren		Abweichung der Wellenspektren in %	
PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 \text{ m}$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$
[–]	[–]	[–]	[–]	$ H(\omega_0) $	$ H(\omega_0) $
				exp. Daten.	exp. Daten.
0.9611	0.9972	0.9430	0.9484	-1.919	-5.146
0.9661	1.0094	0.8655	1.0036	-11.62	-0.578
0.9528	1.0117	0.8896	1.0358	-7.104	2.327
0.8633	0.9200	0.7352	0.8852	-17.42	-3.931
0.6939	0.7111	0.6241	0.7007	-11.18	-1.484
0.4628	0.4378	0.2935	0.4463	-57.68	1.905
0.2300	0.2178	0.1384	0.1967	-66.15	-10.73
0.0278	0.0294	0.0359	0.0448	22.56	34.38
				24.79	-8.889

Tabelle 5.13: Wellenspektren mit *Body Forces* für die Stampfbewegung



## 6 Fazit

Die Dämpfung einzelner Wellenkomponenten durch das verwendete Gitter, konnte durch eine entsprechende Feinheit des Gitter sehr stark reduziert werden. Dies ist durch Simulationen mit einer Einzelwelle und einem Wellenspektrum gezeigt worden. Das Eingangssignal, die Auslenkung der freien Oberfläche, konnte ohne Verluste durch das Berechnungsgebiet transportiert werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass in den späteren Simulationen die Schiffsbewegungen durch die theoretischen Anregungen hervorgerufen werden.

An Hand des ausgewählten Berechnungsbeispielles konnte gezeigt werden, dass die Ermittlung einer allgemeingültigen Übertragungsfunktion mittels eines Seegangsspektrums mit einer ähnlichen Genauigkeit wie die Ermittlung dieser durch Einzelwellen erfolgen kann. Dafür sind zum einen die prozentuale Abweichung der Seegangssimulation zu den Einzelwellensimulationen und zum anderen die Prozessorzeit betrachtet worden. Die Ergebnisse beider Faktoren lassen darauf schließen, dass bei ausreichender Gitterfeinheit die Simulation mit einem Seegangsspektrum der Simulation mit Einzelwellen vorzuziehen ist. Die Einzelbewegungen sind unter Verwendung einer Fourier-Transformation aus dem Ergebnis nur einer Simulation zu extrahieren. Dafür ist im Rahmen der vorliegenden Bachelorthesis ein Programm entwickelt worden, dass das Postprocessing einfacher gestaltet.

Es konnte kein direkter Einfluss der Anzahl an Komponenten des Spektrums ermittelt werden. Es sind Simulationen durchgeführt worden, die eine kleine Anzahl an Komponenten verwenden, als in den ausgewerteten Simulationen verwendet worden sind. Es konnten keine Veränderungen der Ergebnisse bezüglich der Genauigkeit festgestellt werden, nur eine Reduzierung der Prozessorzeiten. Deshalb sind die Simulationen mit weniger Wellenkomponenten auch nicht in dieser Bachelorthesis aufgeführt. Eine aufschlussreichere Untersuchung ist mit einer größeren Anzahl an Wellenkomponenten. Es fehlten jedoch Vergleichsgrundlagen aus experimentellen Datenreihen. Aus diesem Grund sind Simulationen mit mehr als acht Wellenkomponenten nicht durchgeführt worden. Ein direkter Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse konnte der Form des Spektrums nachgewiesen werden. Die Simulationen mit einem konstanten Amplitudenverhältnis waren wesentlich besser als die Simulationen mit einer konstanten Amplitude.

Die Volumenkräfte haben einen direkten Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Schiffes. Durch Simulationen konnte gezeigt werden, dass die Volumenkräfte nicht zu nah an das Schiff gesetzt werden dürfen, da sonst die Bewegungen des Schiffes verfälscht werden. Es konnte auch eine Steigerung der Prozessorzeiten vermerkt werden. Volumenkräfte sind aber nötig, um Reflektionen von den Simulationsrändern zu vermeiden. Weitere Untersuchungen konnten aus zeitlichen Gründen nicht mehr vollzogen werden.

Der *SIMPLE*-Algorithmus bewirkt zwar eine wesentliche Verbesserung der Prozessorzeiten, jedoch ist die Genauigkeit der Ergebnisse schlechter als die des *PISO*-Algorithmus. Es bleibt zu prüfen, wodurch die Ungenauigkeit des *SIMPLE*-Algorithmus zustande kommt. Ein Grund kann die explizite Lösung der Transportgleichung des  $\alpha$ -Feldes sein.

## A Anhang Tabellen

Elementarwelle	Eingangssignal		Ausgangssignal		
	Wellenparameter		exp. Datenreihe	Gitter 2	
	$\omega_0$	$A_\zeta$	$A_\zeta$	$A_\zeta$ (PISO-Alg.)	$A_\zeta$ (SIMPLE-Alg.)
	[rad/s]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	0.350	2.5	2.210	2.151	2.290
2	0.400	2.5	2.028	2.123	2.223
3	0.450	2.5	1.820	1.900	2.051
4	0.500	2.5	1.448	1.513	1.732
5	0.550	2.5	1.133	1.320	1.502
6	0.600	2.5	1.085	1.364	1.233
7	0.650	2.5	0.643	0.864	0.723
8	0.785	2.5	0.303	0.282	0.259

**Tabelle A.1:** Amplituden der Tauchbewegung für Erregeramplitude  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$

Elementarwelle	Eingangssignal		Ausgangssignal		
	Wellenparameter		exp. Datenreihe	Gitter 2	
	$\omega_0$	$A_\zeta$	$A_\zeta$	$A_\zeta$ (PISO-Alg.)	$A_\zeta$ (SIMPLE-Alg.)
	[rad/s]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	0.350	2.5	1.821	1.717	1.768
2	0.400	2.5	2.325	2.258	2.368
3	0.450	2.5	3.010	2.807	2.965
4	0.500	2.5	3.343	3.130	3.314
5	0.550	2.5	3.277	3.123	3.170
6	0.600	2.5	2.492	2.489	2.346
7	0.650	2.5	1.524	1.435	1.345
8	0.785	2.5	0.243	0.211	0.225

**Tabelle A.2:** Amplituden der Stampfbewegung für Erregeramplitude  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$

Elementarwelle	Eingangssignal		Ausgangssignal		
	Wellenparameter		exp. Datenreihe	Gitter 2	
	$\omega_0$	$A_\zeta$	$A_\zeta$	$A_\zeta$ (PISO-Alg.)	$A_\zeta$ (SIMPLE-Alg.)
	[rad/s]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	0.350	2.516	–	2.171	2.245
2	0.400	1.926	–	1.631	1.719
3	0.450	1.522	–	1.159	1.247
4	0.500	1.233	–	0.783	0.854
5	0.550	1.019	–	0.544	0.568
6	0.600	0.856	–	0.372	0.357
7	0.650	0.7295	–	0.208	0.195
8	0.785	0.500	–	0.060	0.055

**Tabelle A.3:** Amplituden der Tauchbewegung für Erregeramplitude  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

Elementarwelle	Eingangssignal		Ausgangssignal		
	Wellenparameter		exp. Datenreihe	Gitter 2	
	$\omega_0$	$A_\zeta$	$A_\zeta$	$A_\zeta$ (PISO-Alg.)	$A_\zeta$ (SIMPLE-Alg.)
	[1/s]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	0.350	2.516	–	1.730	1.795
2	0.400	1.926	–	1.739	1.817
3	0.450	1.522	–	1.715	1.821
4	0.500	1.233	–	1.554	1.656
5	0.550	1.019	–	1.249	1.280
6	0.600	0.856	–	0.833	0.788
7	0.650	0.7295	–	0.414	0.392
8	0.785	0.500	–	0.0495	0.053

**Tabelle A.4:** Amplituden der Stampfbewegung für Erregeramplitude  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

Elementarwelle	Gitter 1		Gitter 2		Gitter 3	
	Abweichung in %		Abweichung in %		Abweichung in %	
	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
1	-2.410	1.295	1.324	1.278	—	—
2	3.727	9.406	0.193	1.670	—	—
3	1.728	11.220	1.592	0.951	—	—
4	0.310	16.619	3.201	1.230	0.986	0.404
5	14.269	21.080	1.076	3.669	0.239	1.309
6	20.571	0.184	1.146	12.432	—	—
7	21.837	1.608	4.109	9.719	—	—
8	-15.458	-26.042	6.634	6.917	—	—

**Tabelle A.5:** Gitterauswertung der Tauchbewegung für  $A_\zeta = 2.5 m$

Elementarwelle	Gitter 1		Gitter 2		Gitter 3	
	Abweichung in %		Abweichung in %		Abweichung in %	
	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
1	-2.448	1.149	1.000	0.777	—	—
2	3.819	9.345	1.429	0.767	—	—
3	2.720	11.782	2.726	0.278	—	—
4	7.405	15.912	2.535	1.586	—	—
5	13.879	16.527	2.471	3.641	0.839	1.153
6	-2.343	-9.266	3.419	5.762	0.979	1.176
7	9.429	1.326	1.481	3.564	—	—
8	-2.542	-14.151	2.667	4.636	—	—

**Tabelle A.6:** Gitterauswertung der Tauchbewegung für  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

Elementarwelle	Gitter 1		Gitter 2		Gitter 3	
	Abweichung in %		Abweichung in %		Abweichung in %	
	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
1	-6.228	-2.462	0.825	1.507	—	—
2	-3.048	2.074	0.911	1.253	—	—
3	-8.698	-1.547	0.372	0.966	—	—
4	-9.645	-1.768	1.657	0.117	1.010	0.332
5	-7.965	-7.329	1.899	2.832	0.741	1.408
6	3.224	-12.701	2.107	5.106	—	—
7	-13.198	-22.875	5.612	7.468	—	—
8	-17.391	-11.982	0.932	2.687	—	—

**Tabelle A.7:** Gitterauswertung der Stampfbewegung für  $A_{\zeta} = 2.5m$

Elementarwelle	Gitter 1		Gitter 2		Gitter 3	
	Abweichung in %		Abweichung in %		Abweichung in %	
	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
1	-5.492	-2.655	0.595	1.557	—	—
2	-2.343	2.345	0.367	0.064	—	—
3	-7.409	-0.737	1.528	1.110	—	—
4	-8.189	-1.091	2.931	2.510	—	—
5	-10.655	-7.971	4.363	4.360	0.736	0.752
6	-8.412	-14.370	6.522	6.330	0.573	0.489
7	-12.273	-21.475	5.348	7.633	—	—
8	4.706	6.538	2.030	2.887	—	—

**Tabelle A.8:** Gitterauswertung der Stampfbewegung für  $A_{\zeta}/\lambda = 1/200$

Elementarwelle	Gitter 1		Gitter 2		Gitter 3	
	Prozessorzeit [h]		Prozessorzeit [h]		Prozessorzeit [h]	
	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
1	153.20	106.97	626.37	374.08	—	—
2	148.70	105.87	590.53	422.79	—	—
3	157.83	102.35	690.64	406.00	—	—
4	164.74	116.61	642.92	445.81	1238.16	1821.21
5	198.14	127.24	642.56	495.66	1295.29	1931.02
6	194.57	134.75	637.88	498.63	—	—
7	183.42	110.99	615.27	493.62	—	—
8	183.25	127.63	607.88	501.74	—	—

**Tabelle A.9:** Gitterauswertung der Prozessorzeit für  $A_\zeta = 2.5 m$

Elementarwelle	Gitter 1		Gitter 2		Gitter 3	
	Prozessorzeit [h]		Prozessorzeit [h]		Prozessorzeit [h]	
	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.	SIMPLE-Alg.
1	181.07	110.81	618.77	229.43	—	—
2	166.46	114.14	552.01	229.51	—	—
3	164.50	110.03	565.36	336.64	—	—
4	169.12	109.71	569.08	378.72	—	—
5	154.74	107.95	559.23	381.88	795.36	1189.59
6	161.79	94.08	530.30	381.95	798.52	1168.48
7	159.38	105.01	543.04	228.78	—	—
8	152.62	107.81	560.65	378.63	—	—

**Tabelle A.10:** Gitterauswertung der Prozessorzeit für  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

Elementarwelle	exp. Datenreihe	Abweichung zur exp. Datenreihen in %			
		<i>PISO</i> -Alg.		<i>SIMPLE</i> -Alg.	
		$A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/200$	$A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/200$
1	0.884	-2.743	-2.448	3.493	0.929
2	0.811	4.498	4.231	8.794	9.134
3	0.728	4.211	4.399	11.263	11.145
4	0.579	4.329	8.824	16.426	16.404
5	0.453	14.205	15.146	24.601	18.731
6	0.434	20.455	0.133	12.003	-4.063
7	0.257	25.637	9.865	11.134	3.856
8	0.121	-7.270	-0.833	-16.795	-10.000

**Tabelle A.11:** Einzelwellen - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur exp. Datenreihe

Elementarwelle	exp. Datenreihe	Abweichung zur exp. Datenreihe in %			
		<i>PISO</i> -Alg.		<i>SIMPLE</i> -Alg.	
		$A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/200$	$A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/200$
1	1.018	-6.042	-5.919	-2.983	-2.084
2	0.995	-2.957	-2.990	-1.826	1.431
3	1.018	-7.227	-6.845	-1.513	-0.626
4	0.916	-6.807	-6.100	-0.877	0.435
5	0.742	-4.923	-6.934	-3.367	-4.344
6	0.474	-0.113	-2.425	-6.216	-8.274
7	0.247	-6.177	-7.391	-13.282	-13.418
8	0.027	-15.166	1.818	-8.000	8.302

**Tabelle A.12:** Einzelwellen - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur exp. Datenreihe

$ H(\omega_0) $ der Einzelwellen			Abweichung der Wellenspektren in %			
PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.	
$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	
[-]	[-]	[-]	[-]	$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	
0.8604	0.8629	0.9160	0.8923	10.09	4.494	-4.253
0.8492	0.8468	0.8892	0.8925	-7.972	1.068	-3.912
0.7600	0.7615	0.8204	0.8193	2.326	10.70	0.979
0.6052	0.6350	0.6928	0.6926	5.615	6.188	6.431
0.5280	0.5339	0.6008	0.5574	-21.60	6.578	4.669
0.5456	0.4346	0.4932	0.4171	-62.28	-48.64	4.902
0.3456	0.2851	0.2892	0.2673	-42.69	-41.00	11.43
0.1128	0.1200	0.1036	0.1100	-65.40	-108.0	-52.78

**Tabelle A.13:** Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur Einzelwellensimulation

$ H(\omega_0) $ der Einzelwellen			Abweichung der Wellenspektren in %			
PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.		SIMPLE-Alg.	
$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	
[-]	[-]	[-]	[-]	$A_\zeta = 2.5 m$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	
0.9600	0.9611	0.9885	0.9972	13.26	4.576	-6.345
0.9664	0.9661	1.0135	1.0094	-0.478	-8.640	-0.598
0.9494	0.9528	1.0028	1.0117	-6.697	-8.563	2.599
0.8576	0.8633	0.9080	0.9200	-5.916	-35.40	-5.565
0.7072	0.6939	0.7178	0.7111	-32.53	-29.12	-5.945
0.4735	0.4628	0.4463	0.4378	-47.97	-69.44	1.109
0.2326	0.2300	0.2180	0.2178	-36.66	-72.60	-13.38
0.0234	0.0278	0.0250	0.0294	60.47	21.14	30.82

**Tabelle A.14:** Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur Einzelwellensimulation

Elementarwelle	$A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$		$A_{\zeta}/\lambda = 1/200$	
	Abweichung in %		Abweichung in %	
	<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.	<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.
1	7.628	7.830	-6.544	-3.283
2	-3.115	9.769	-0.570	5.577
3	6.439	20.68	3.178	12.01
4	9.701	21.59	11.45	21.78
5	-4.861	29.56	12.75	22.52
6	-29.09	-30.80	0.207	1.048
7	-6.111	-25.30	-25.30	14.84
8	-77.42	142.97	-10.91	-68.06

**Tabelle A.15:** Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur exp. Datenreihe

Elementarwelle	$A_{\zeta} = 2.5 \text{ m}$		$A_{\zeta}/\lambda = 1/200$	
	Abweichung in %		Abweichung in %	
	<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.	<i>PISO</i> -Alg.	<i>SIMPLE</i> -Alg.
1	8.023	1.737	-12.30	-8.564
2	-3.452	-6.645	-4.627	0.797
3	-14.70	-10.17	-4.197	2.021
4	-35.10	-36.51	-13.07	-5.106
5	-39.06	-33.69	-13.11	-10.55
6	-48.17	-80.23	-5.333	9.469
7	-43.25	-96.03	-20.49	-28.65
8	28.95	12.90	44.89	36.47

**Tabelle A.16:** Wellenspektrum - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur exp. Datenreihe

$ H(\omega_0) $ der Einzelwellen		Abweichung der Wellenspektren in %					
PISO-Alg	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.			SIMPLE-Alg.		
$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta/\lambda = 1/250$	$A_\zeta/\lambda = 1/300$	$A_\zeta/\lambda = 1/300$	$A_\zeta/\lambda = 1/350$	$A_\zeta/\lambda = 1/400$	$A_\zeta/\lambda = 1/400$
[–]	[–]						
0.8629	0.8923	0.645	-4.127	-4.607	-4.595	-4.620	
0.8468	0.8925	-7.804	-5.108	-4.729	-4.864	-4.926	
0.7615	0.8193	-16.81	0.471	3.861	1.212	1.277	
0.6350	0.6926	-3.252	5.393	6.544	6.595	6.633	
0.5339	0.5574	-0.357	0.4289	3.212	2.909	2.909	
0.4346	0.4171	-16.64	-4.446	-0.846	-1.931	-2.406	
0.2851	0.2673	23.85	9.117	11.49	10.27	10.00	
0.1200	0.1100	18.20	5.956	-11.68	-5.163	-1.852	

**Tabelle A.17:** Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur Einzelwellensimulation mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

$ H(\omega_0) $ der Einzelwellen		Abweichung der Wellenspektren in %					
PISO-Alg	SIMPLE-Alg.	PISO-Alg.			SIMPLE-Alg.		
$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta/\lambda = 1/200$	$A_\zeta/\lambda = 1/250$	$A_\zeta/\lambda = 1/300$	$A_\zeta/\lambda = 1/300$	$A_\zeta/\lambda = 1/350$	$A_\zeta/\lambda = 1/400$	$A_\zeta/\lambda = 1/400$
[–]	[–]						
0.9611	0.9972	4.254	-3.199	-4.125	-3.908	-3.735	
0.9661	1.0094	-4.173	1.489	1.962	2.430	5.158	
0.9528	1.0117	4.067	4.481	4.277	4.665	4.942	
0.8633	0.8200	-1.888	-4.389	7.679	8.154	8.543	
0.6939	0.7111	-0.129	-4.456	-4.236	-3.871	-3.418	
0.4628	0.4378	-1.780	-2.685	-0.229	-0.206	-0.092	
0.2300	0.2178	6.807	-8.490	-9.064	-9.337	-9.392	
0.0278	0.0294	21.91	15.63	1.342	-10.53	-19.51	

**Tabelle A.18:** Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur Einzelwellensimulation mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$

Elementarwelle	<i>PISO</i> -Alg.		<i>SIMPLE</i> -Alg.		
	Abweichung in %		Abweichung in %		
	$A_{\zeta}/\lambda = 1/250$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/300$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/300$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/350$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/400$
1	-1.785	-6.673	-3.634	-3.622	-3.646
2	-3.246	-0.658	4.834	4.711	4.656
3	4.849	4.849	12.11	12.22	12.28
4	5.85	13.74	21.87	21.91	21.95
5	14.85	15.53	21.34	21.09	21.09
6	-16.48	-4.326	-4.932	-6.061	-6.556
7	30.35	18.07	14.90	13.73	13.47
8	17.52	5.321	-22.84	-15.68	-12.04

**Tabelle A.19:** Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Tauchbewegung zur exp. Datenreihe

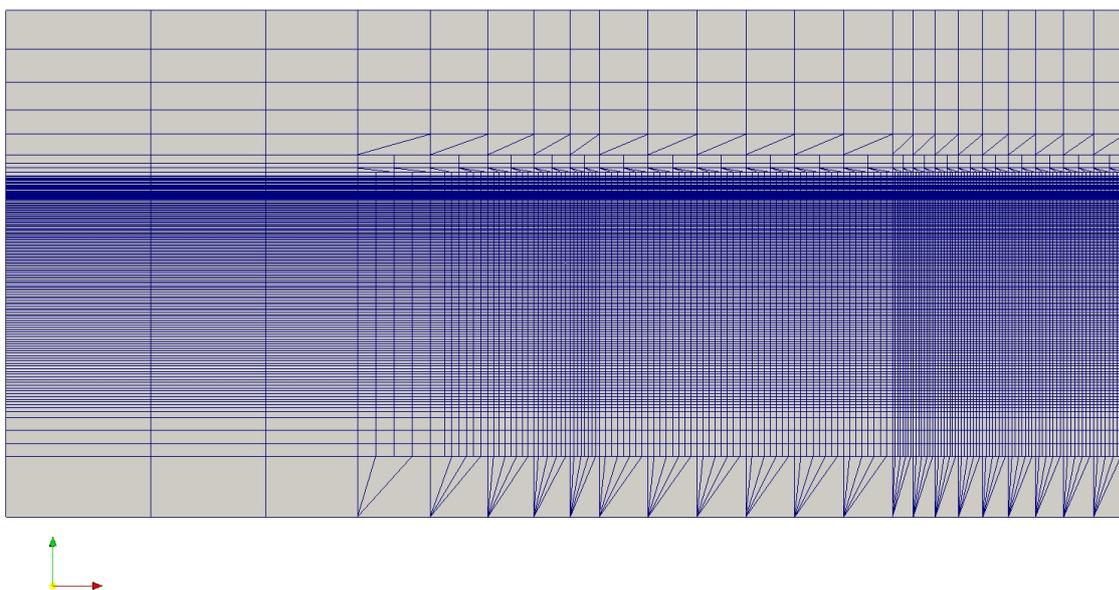
Elementarwelle	<i>PISO</i> -Alg.		<i>SIMPLE</i> -Alg.		
	Abweichung in %		Abweichung in %		
	$A_{\zeta}/\lambda = 1/250$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/300$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/300$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/350$	$A_{\zeta}/\lambda = 1/400$
1	-1.415	-9.309	-6.296	-6.080	-5.898
2	-7.289	-1.458	3.361	3.744	4.022
3	-2.497	-2.055	3.681	4.071	4.350
4	-8.108	-10.76	-3.130	-2.599	-2.164
5	-7.071	-11.69	-8.766	-8.384	-7.912
6	-6.516	-5.146	-8.516	-8.492	-8.367
7	0.081	-16.40	-23.69	-23.99	-24.06
8	24.16	16.67	9.400	-1.504	-9.756

**Tabelle A.20:** Wellenspektrenvariation - Prozentuale Abweichung der Stampfbewegung zur exp. Datenreihe

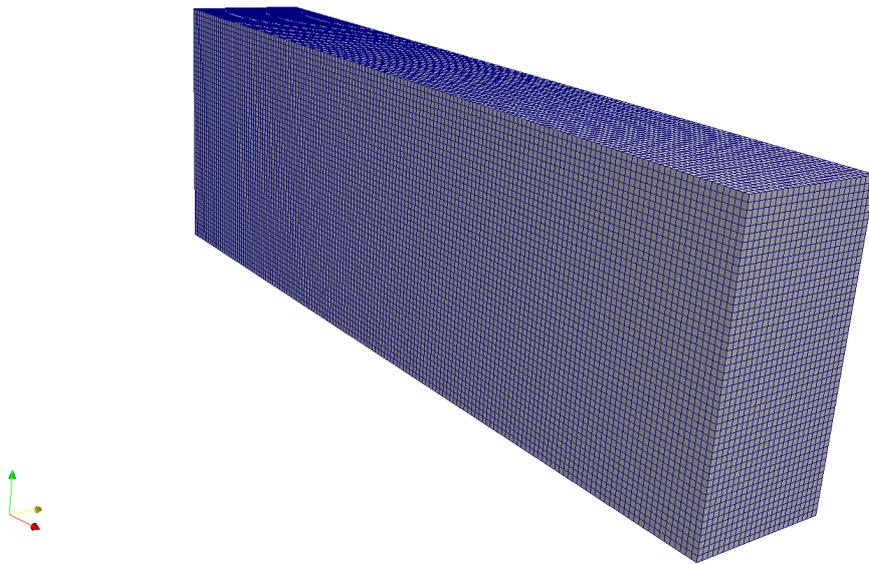
## B Anhang Bilder und Graphen



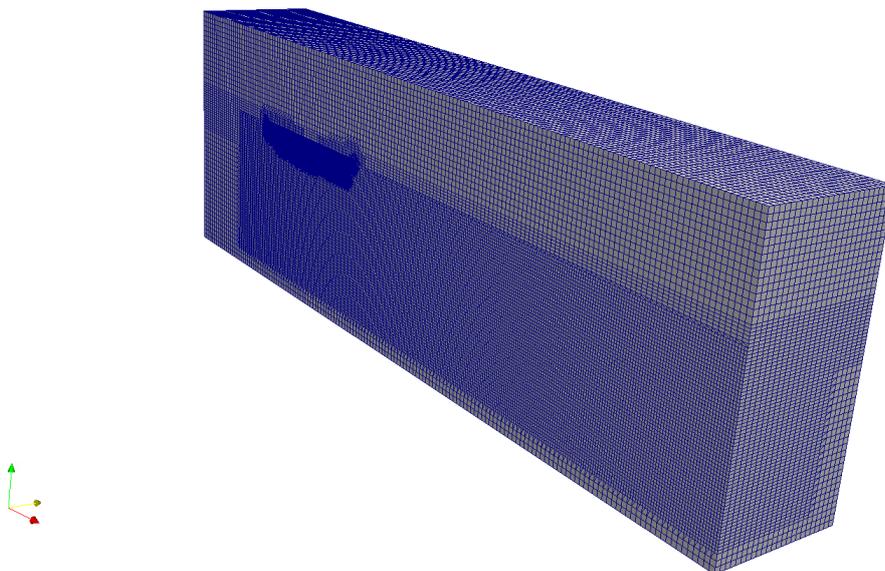
**Abbildung B.1:** Schiffsrumpf



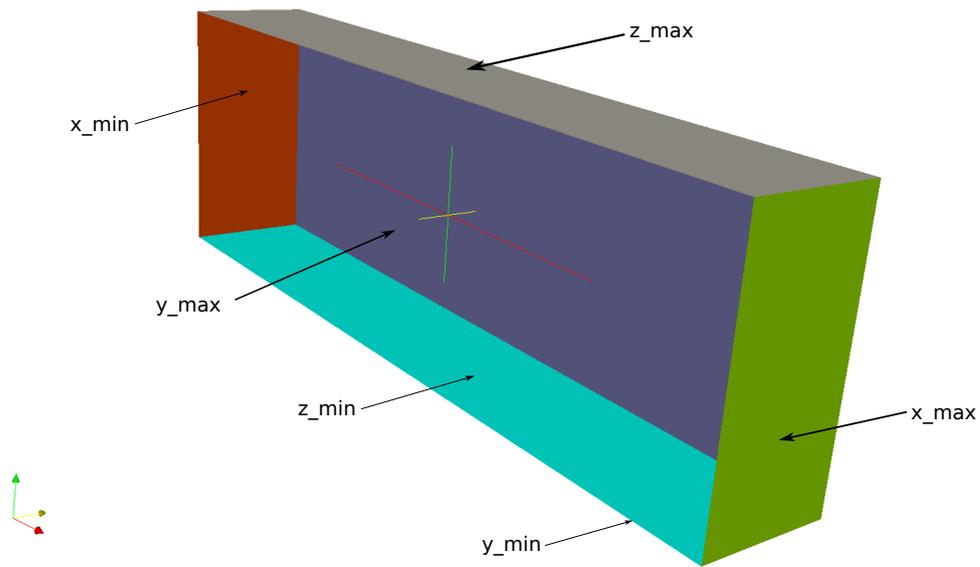
**Abbildung B.2:** Gitter für Wellendämpfung



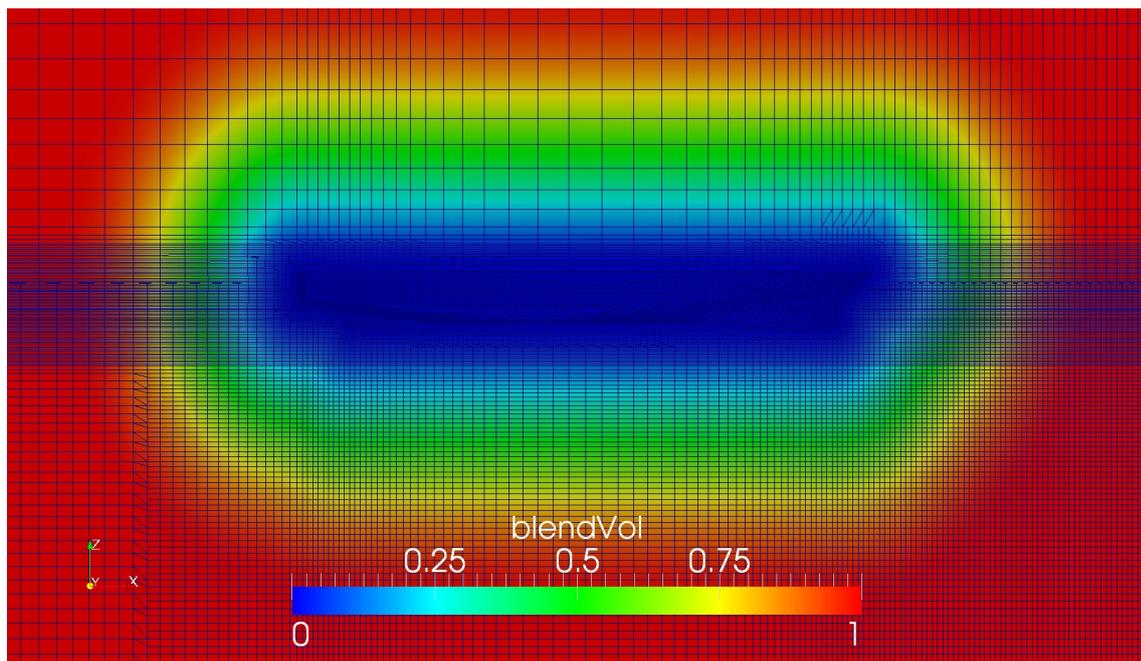
**Abbildung B.3:** Blocknetz



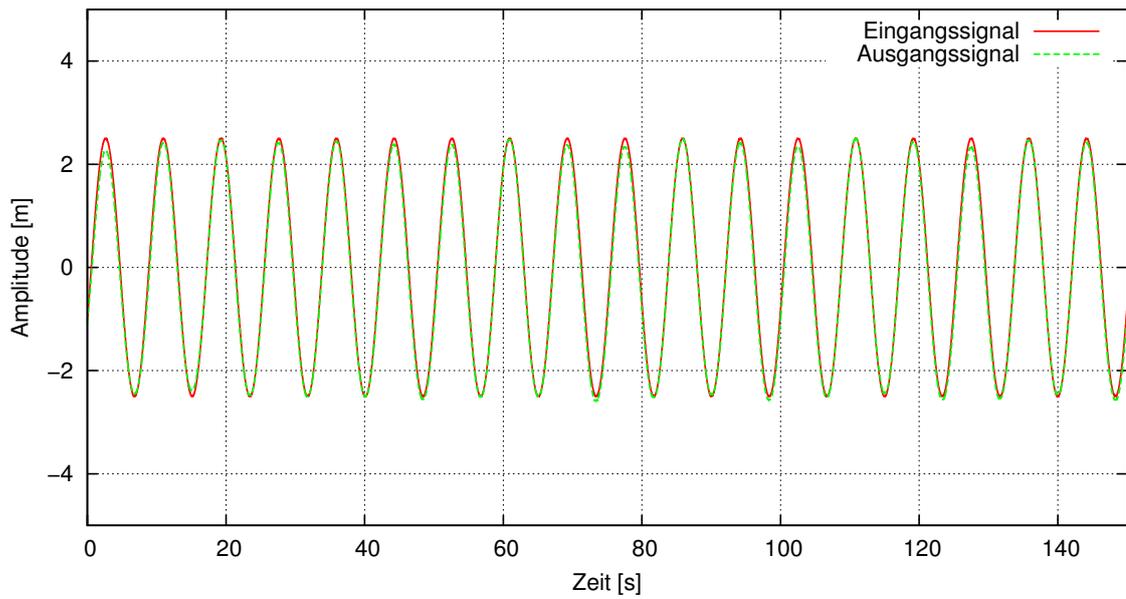
**Abbildung B.4:** Verfeinertes Blocknetz



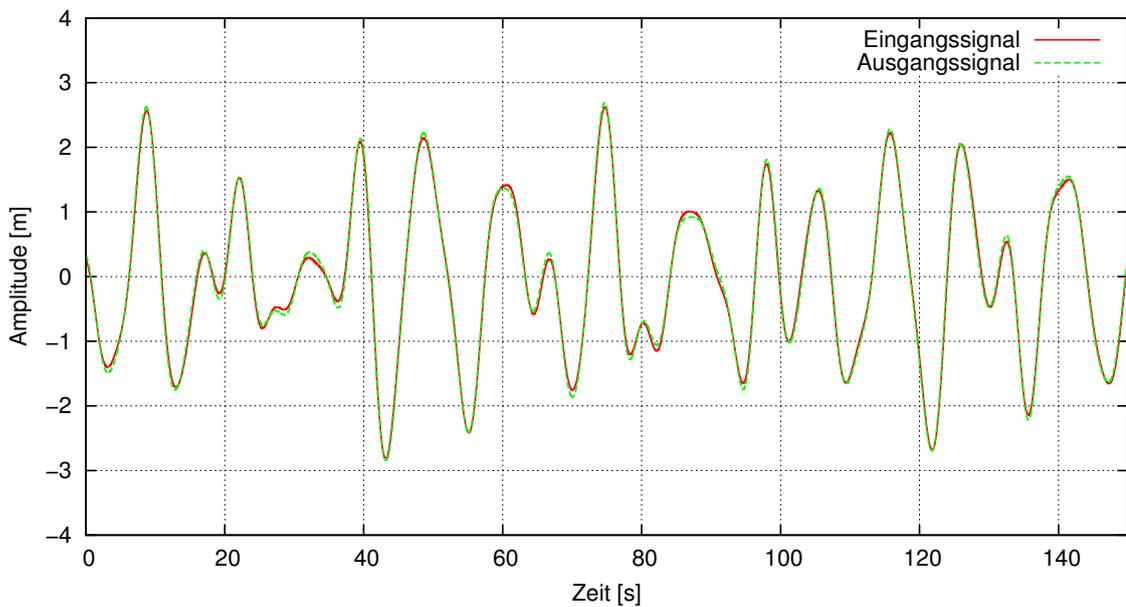
**Abbildung B.5:** Randbedingung



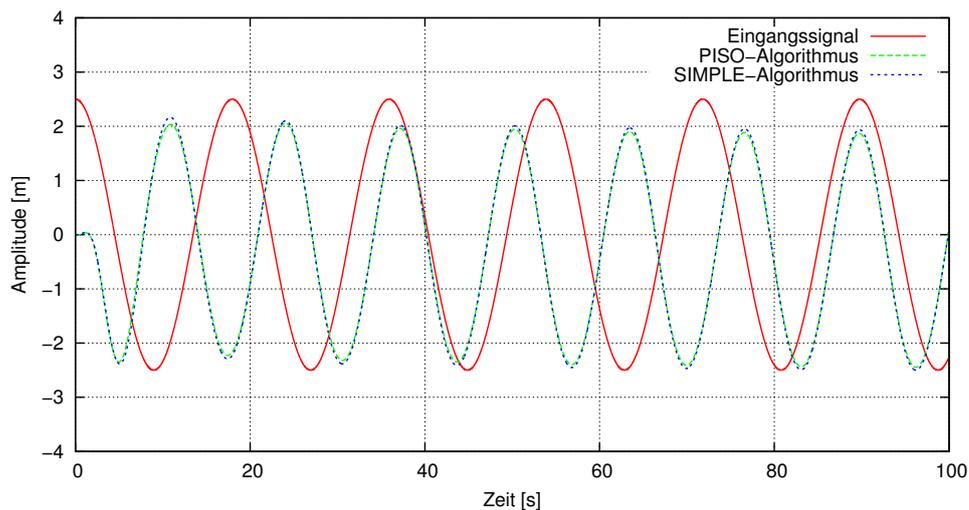
**Abbildung B.6:** Gitterbewegung



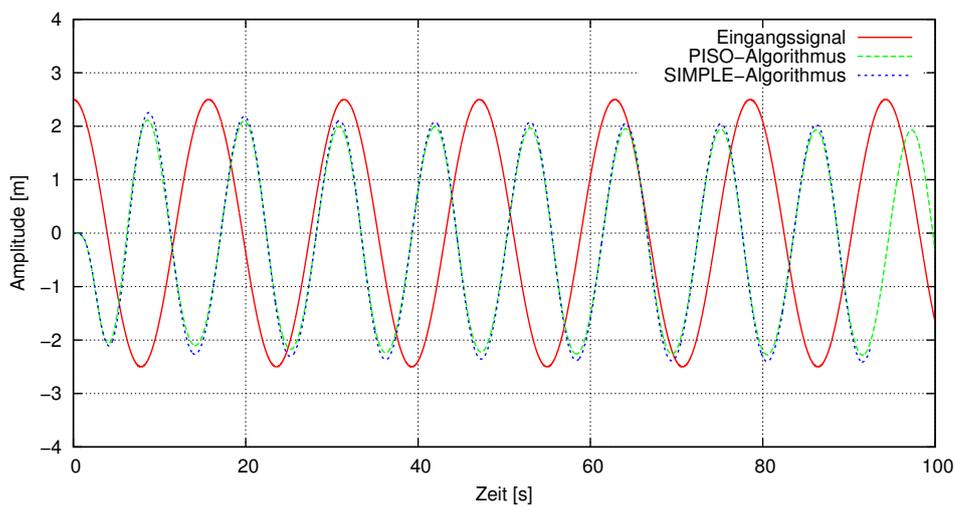
**Abbildung B.7:** Eingangs- und Ausgangssignal der Dämpfung einer Elementarwelle



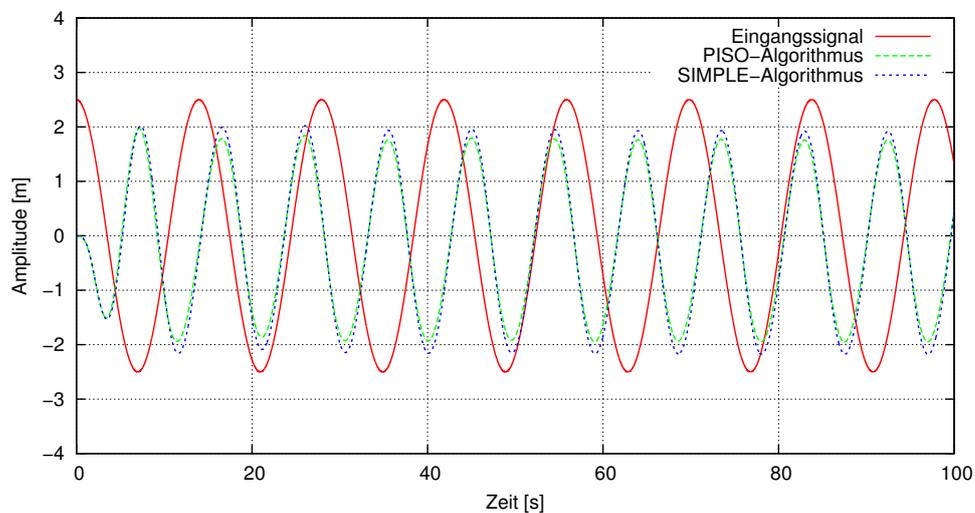
**Abbildung B.8:** Eingangs- und Ausgangssignal der Dämpfung eines Wellenspektrums



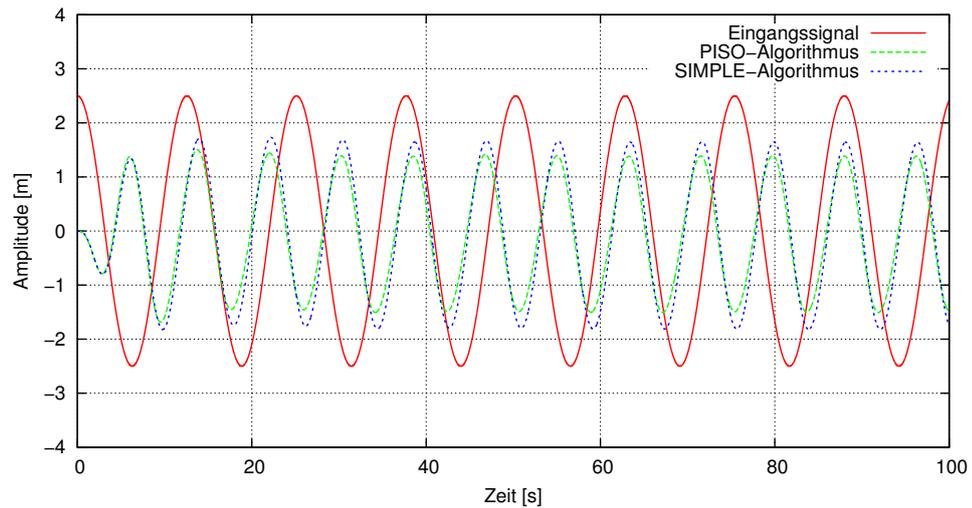
**Abbildung B.9:** Tauchbewegung für die erste Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



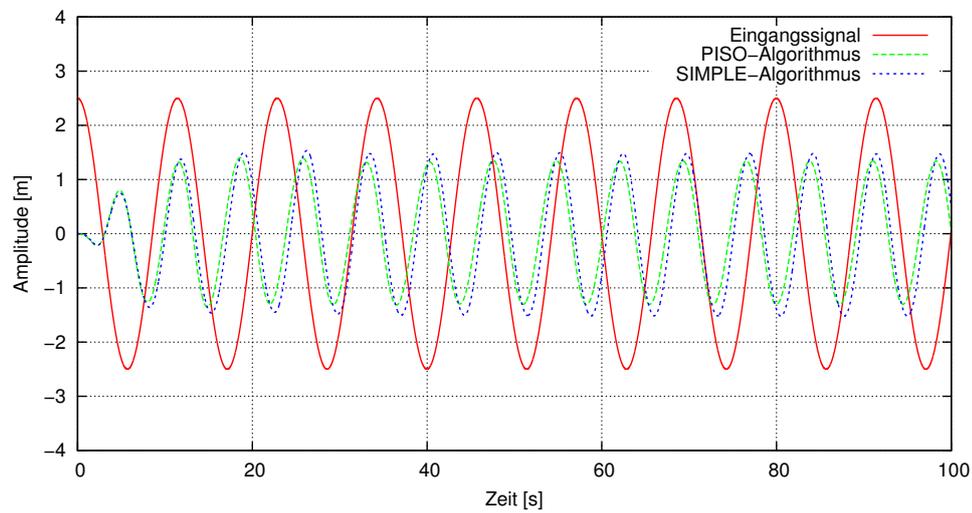
**Abbildung B.10:** Tauchbewegung für die zweite Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



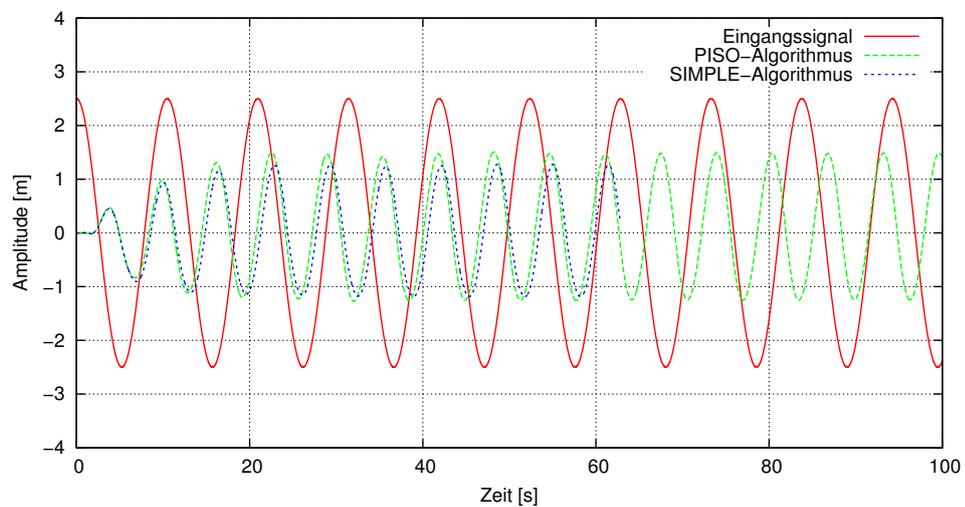
**Abbildung B.11:** Tauchbewegung für die dritte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



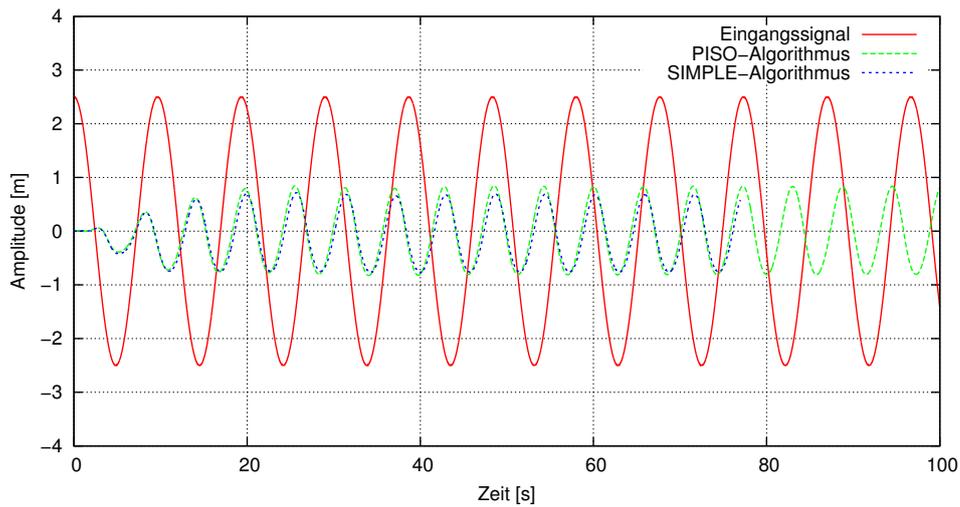
**Abbildung B.12:** Tauchbewegung für die vierte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



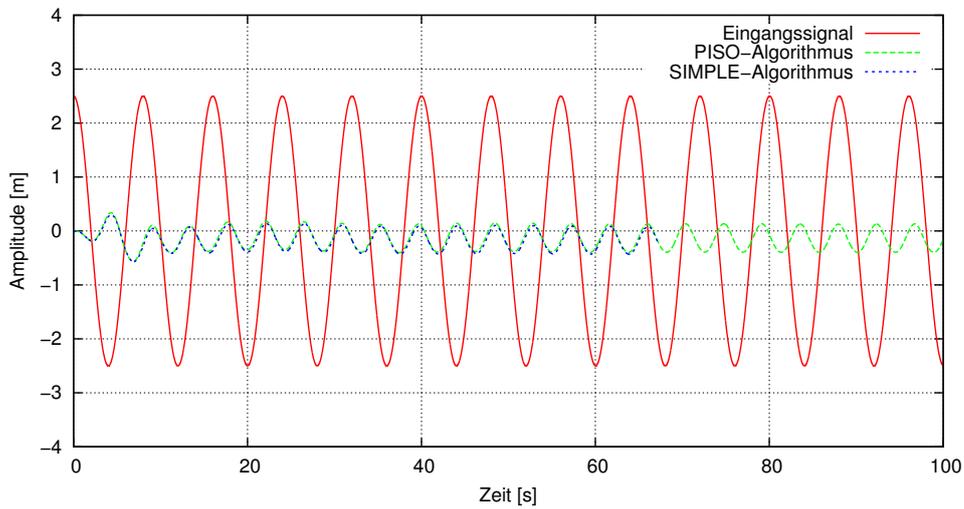
**Abbildung B.13:** Tauchbewegung für die fünfte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



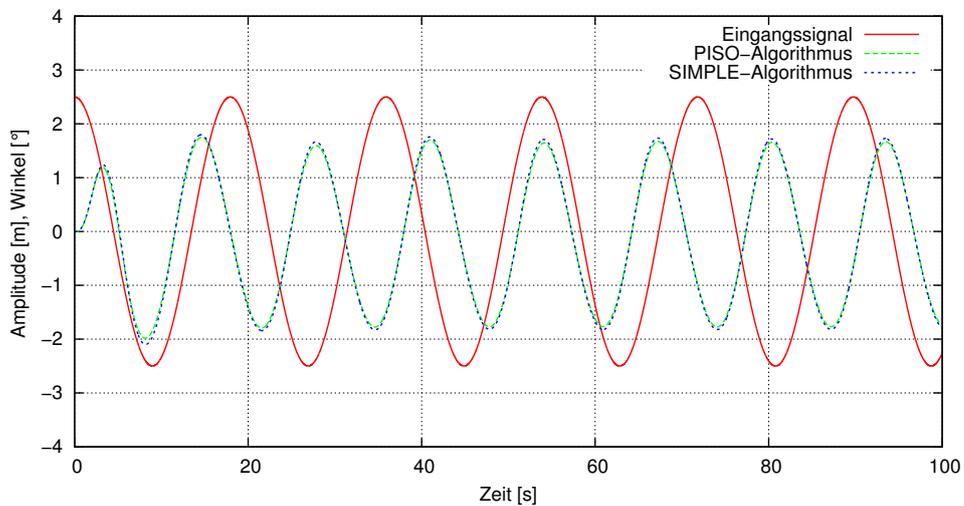
**Abbildung B.14:** Tauchbewegung für die sechste Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



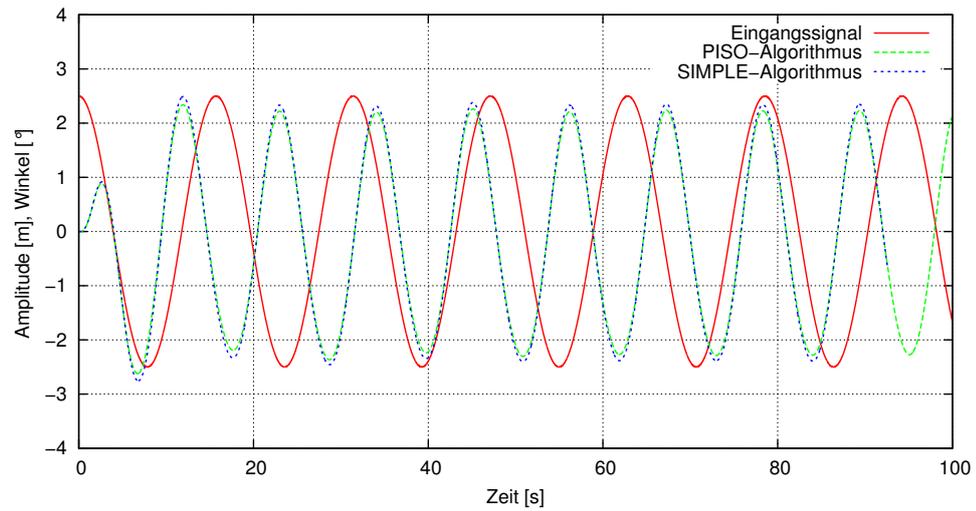
**Abbildung B.15:** Tauchbewegung für die siebte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



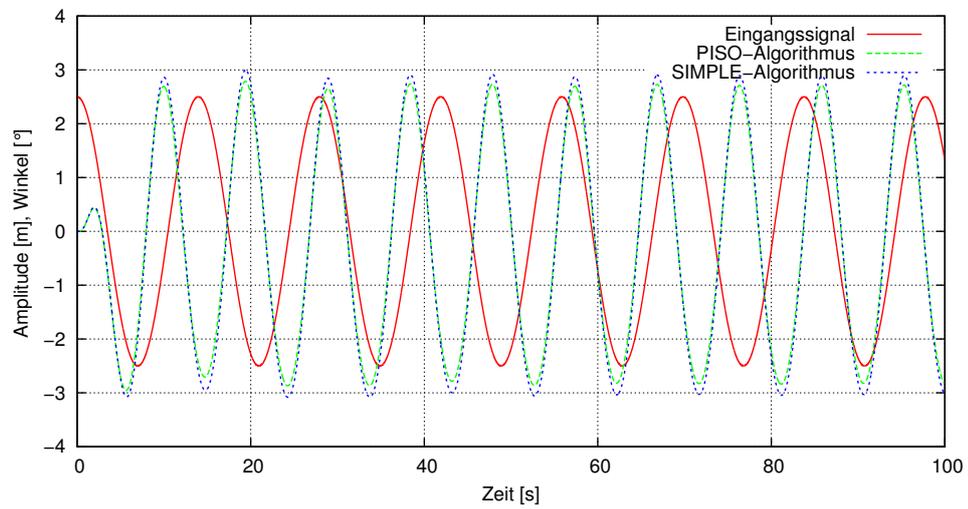
**Abbildung B.16:** Tauchbewegung für die achte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



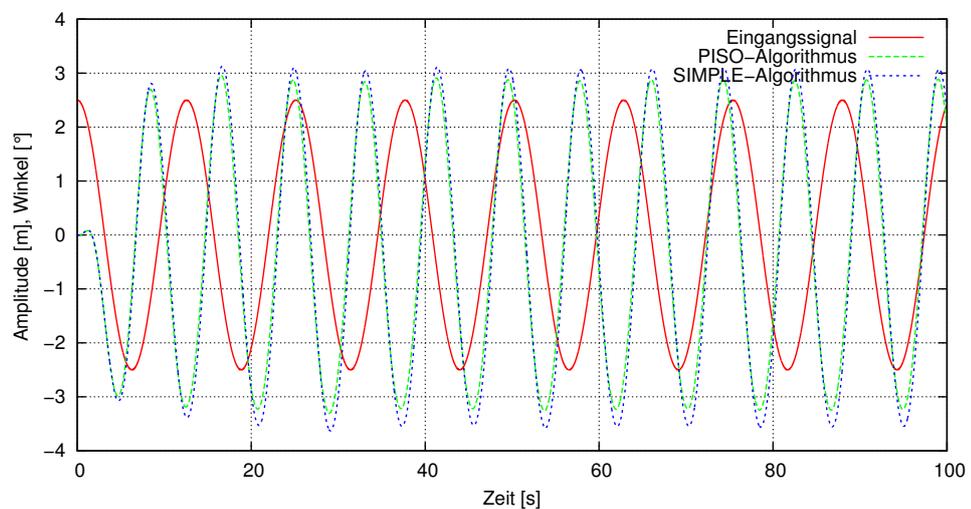
**Abbildung B.17:** Stampfbewegung für die erste Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



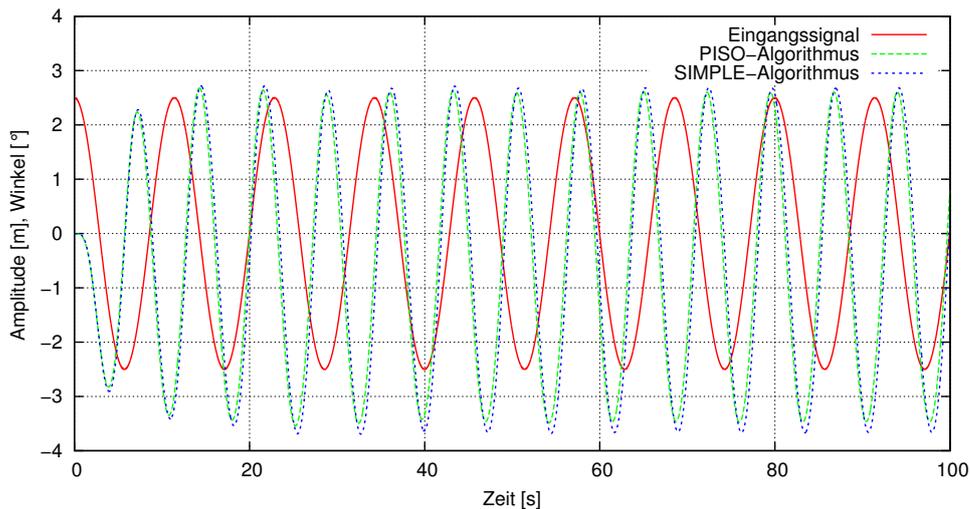
**Abbildung B.18:** Stampfbewegung für die zweite Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 m$



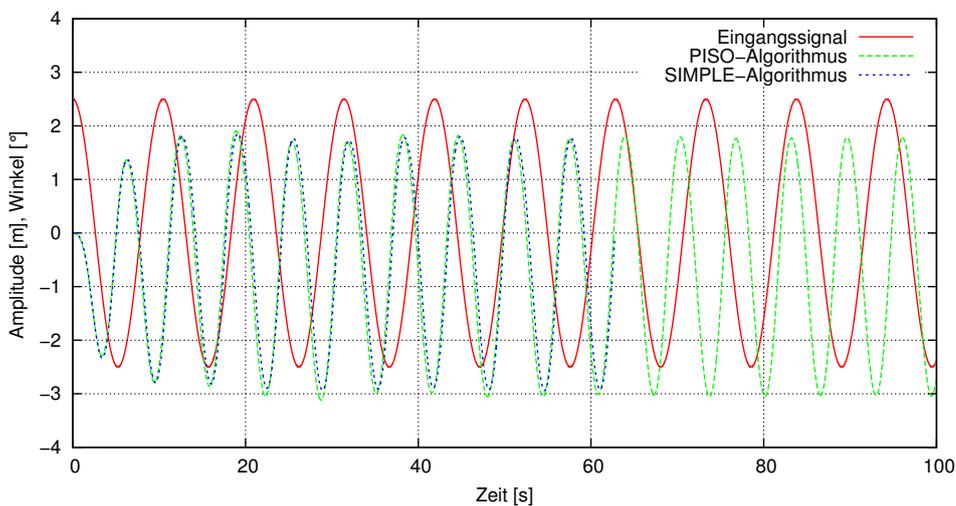
**Abbildung B.19:** Stampfbewegung für die dritte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 m$



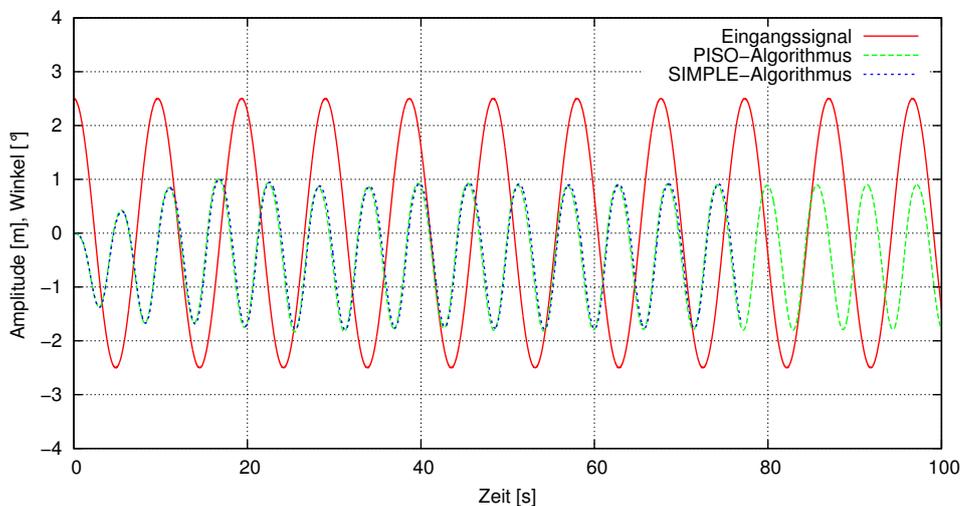
**Abbildung B.20:** Stampfbewegung für die vierte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 m$



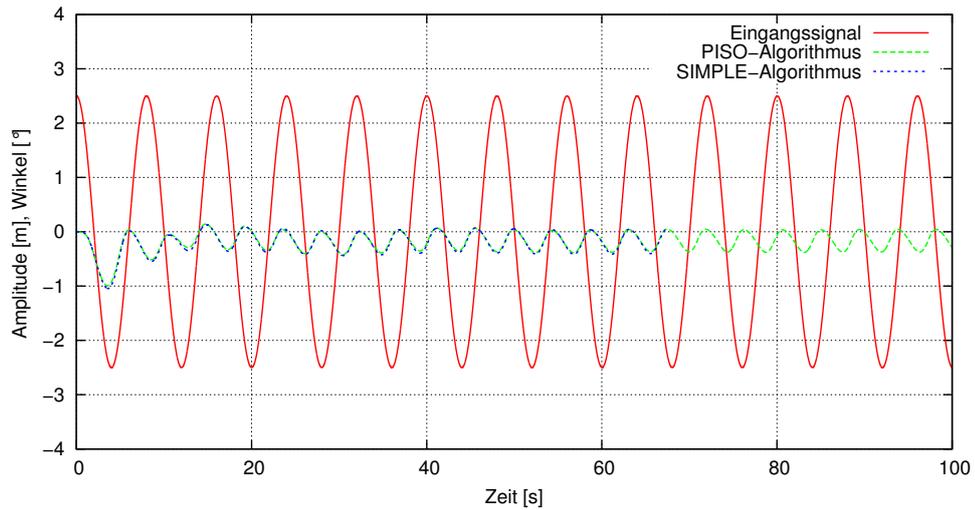
**Abbildung B.21:** Stampfbewegung für die fünfte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 m$



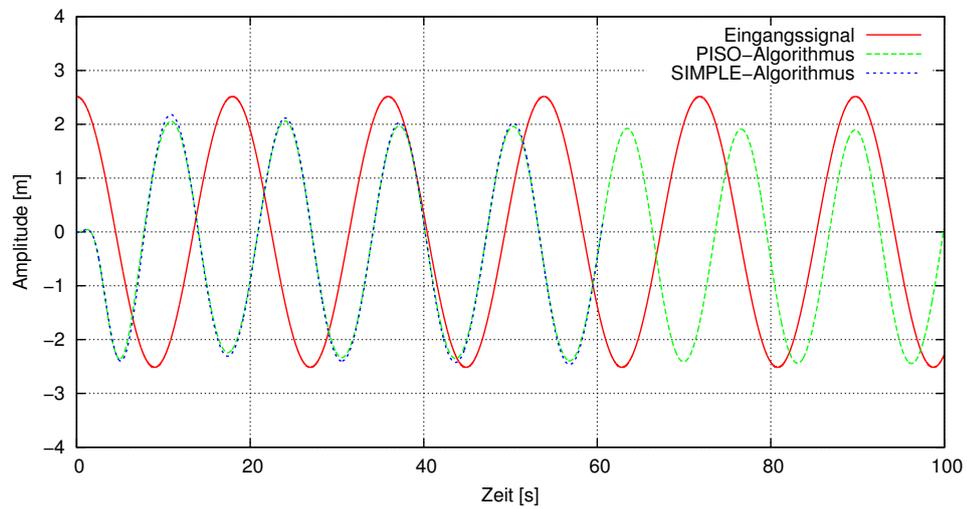
**Abbildung B.22:** Stampfbewegung für die sechste Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 m$



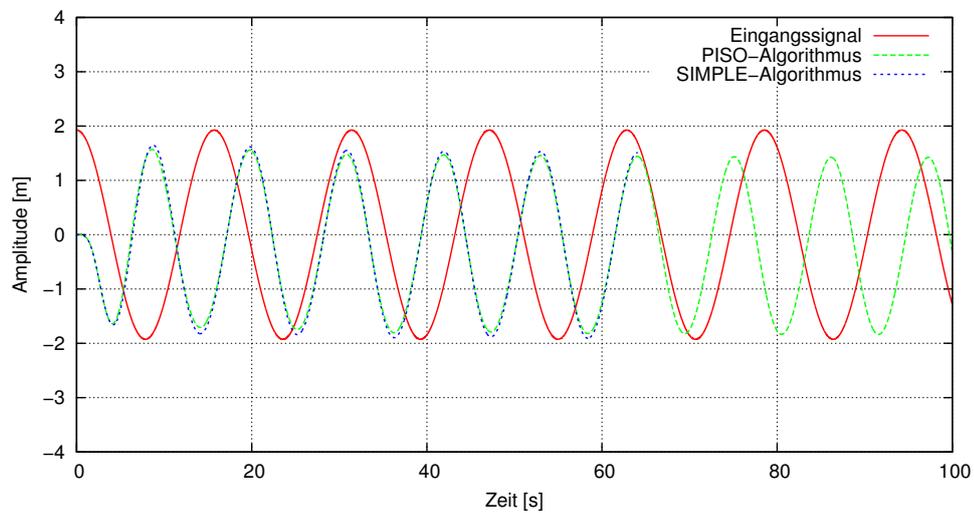
**Abbildung B.23:** Stampfbewegung für die siebte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 m$



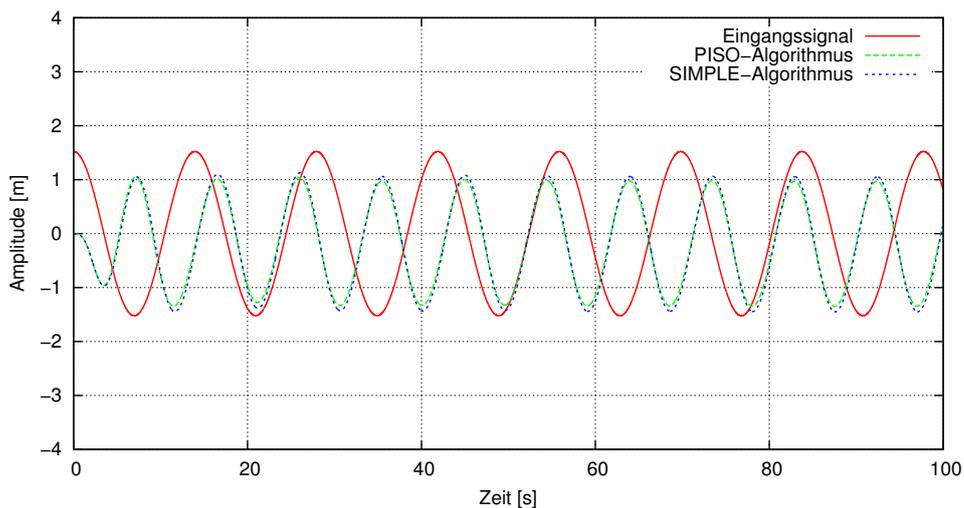
**Abbildung B.24:** Stampfbewegung für die achte Elementarwelle mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



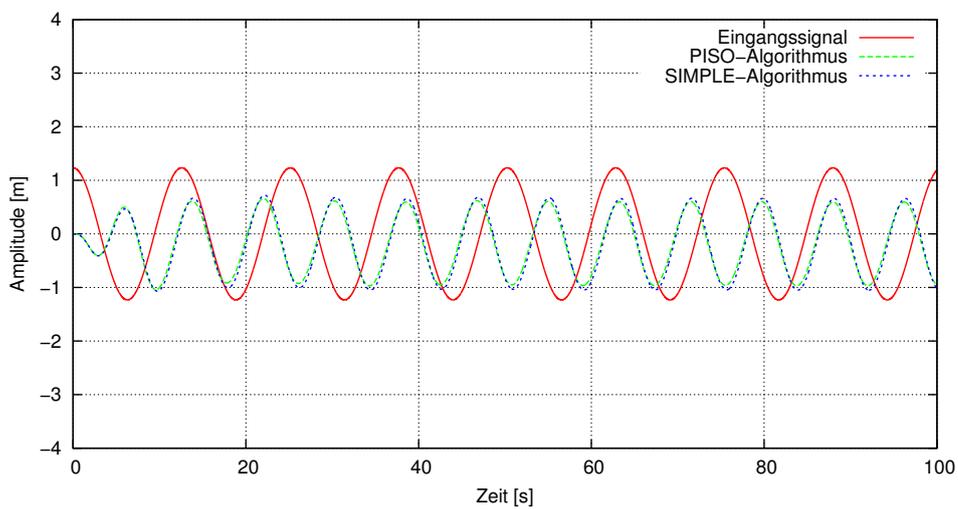
**Abbildung B.25:** Tauchbewegung für die erste Elementarwelle mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$



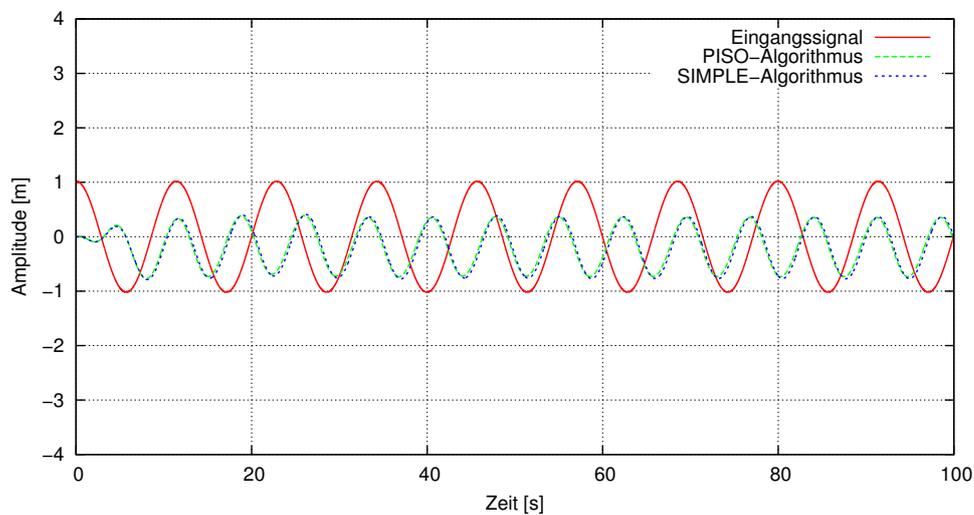
**Abbildung B.26:** Tauchbewegung für die zweite Elementarwelle mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$



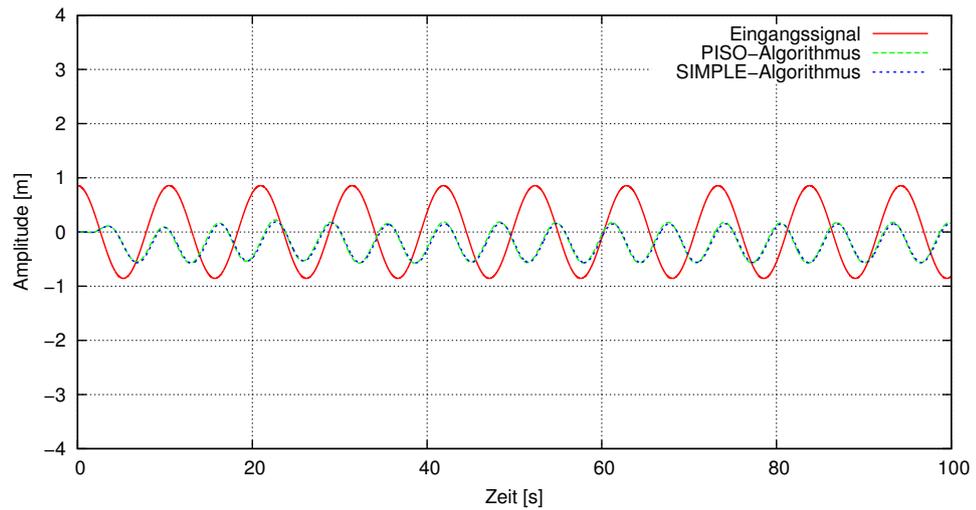
**Abbildung B.27:** Tauchbewegung für die dritte Elementarwelle mit  $A_\xi/\lambda = 1/200$



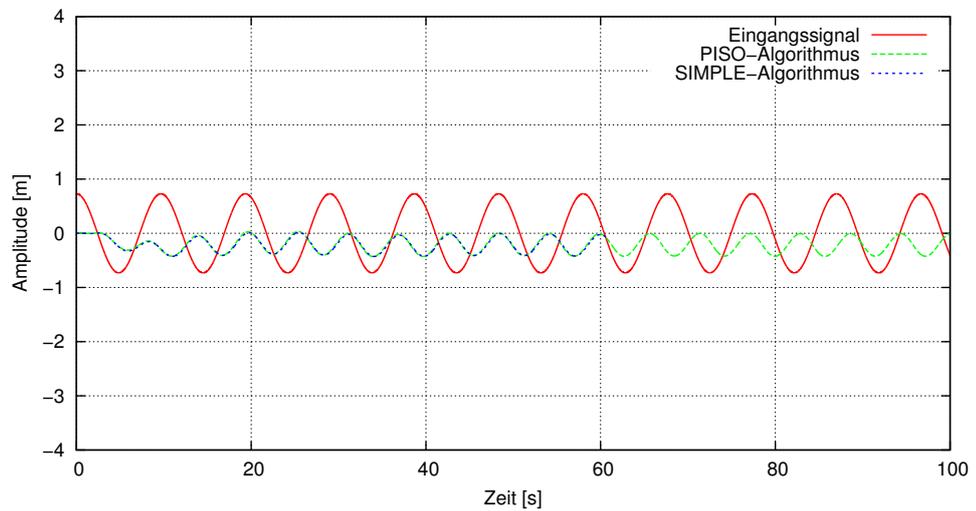
**Abbildung B.28:** Tauchbewegung für die vierte Elementarwelle mit  $A_\xi/\lambda = 1/200$



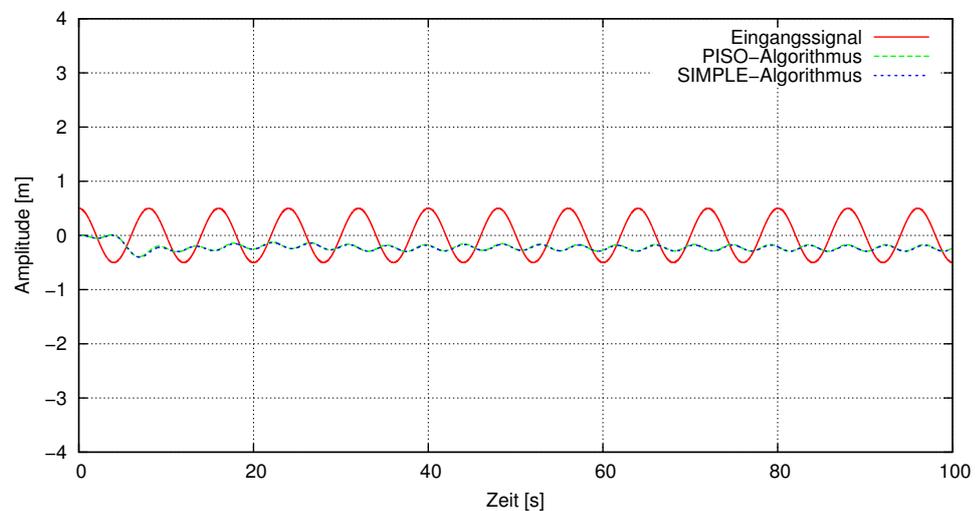
**Abbildung B.29:** Tauchbewegung für die fünfte Elementarwelle mit  $A_\xi/\lambda = 1/200$



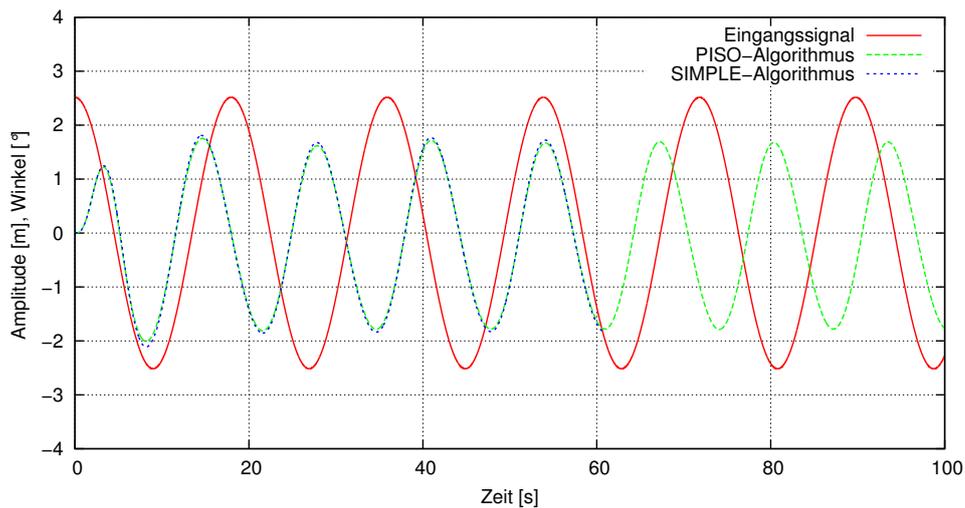
**Abbildung B.30:** Tauchbewegung für die sechste Elementarwelle mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$



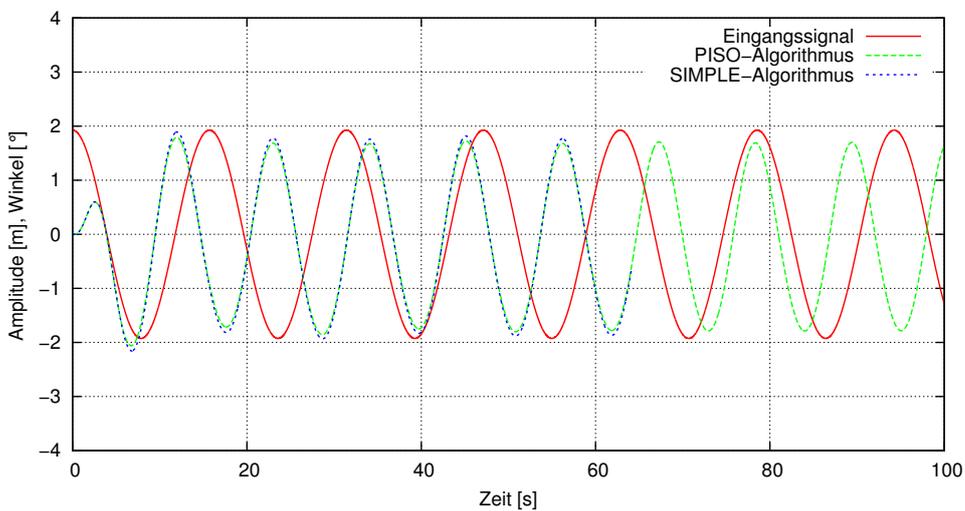
**Abbildung B.31:** Tauchbewegung für die siebte Elementarwelle mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$



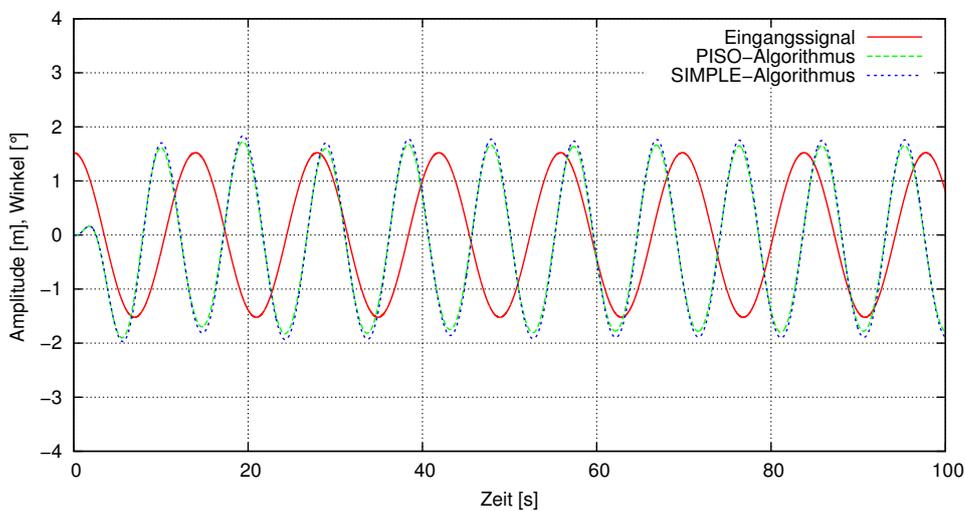
**Abbildung B.32:** Tauchbewegung für die achte Elementarwelle mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$



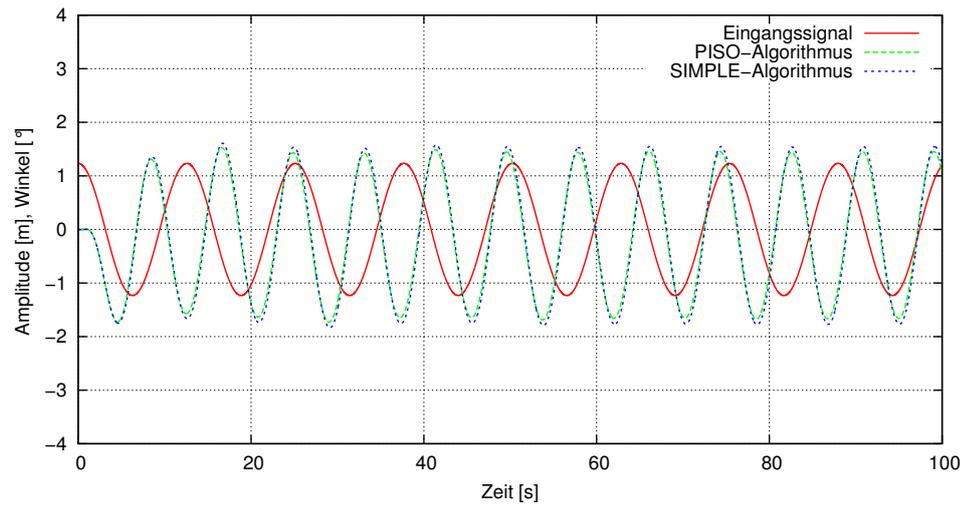
**Abbildung B.33:** Stampfbewegung für die erste Elementarwelle mit  $A_{\zeta}/\lambda = 1/200$



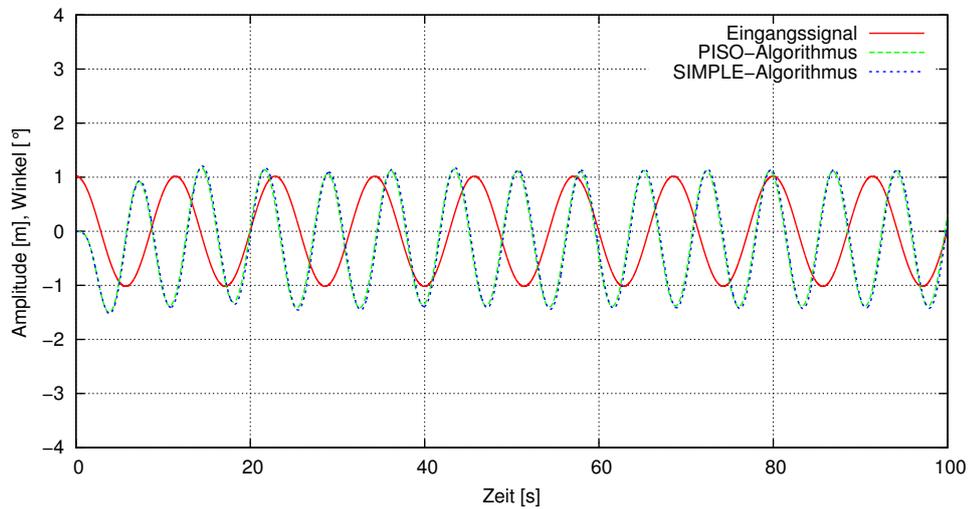
**Abbildung B.34:** Stampfbewegung für die zweite Elementarwelle mit  $A_{\zeta}/\lambda = 1/200$



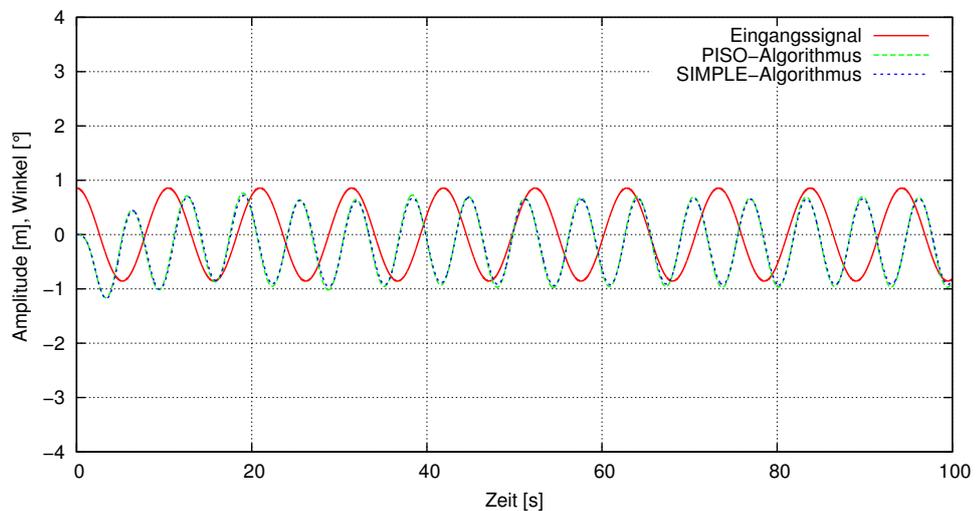
**Abbildung B.35:** Stampfbewegung für die dritte Elementarwelle mit  $A_{\zeta}/\lambda = 1/200$



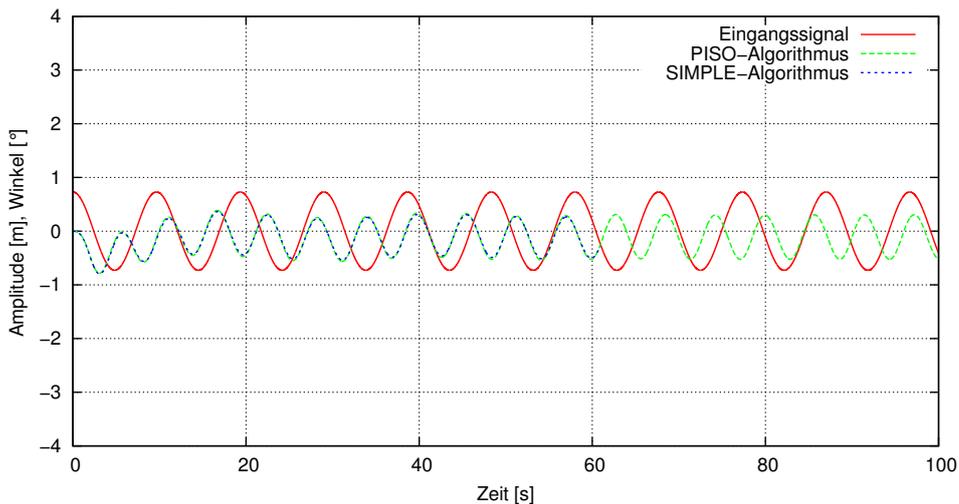
**Abbildung B.36:** Stampfbewegung für die vierte Elementarwelle mit  $A_z/\lambda = 1/200$



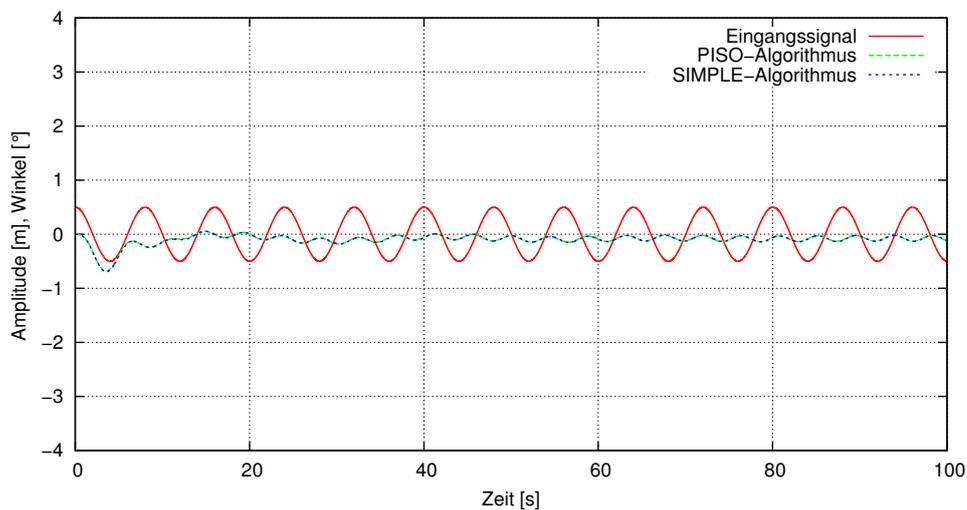
**Abbildung B.37:** Stampfbewegung für die fünfte Elementarwelle mit  $A_z/\lambda = 1/200$



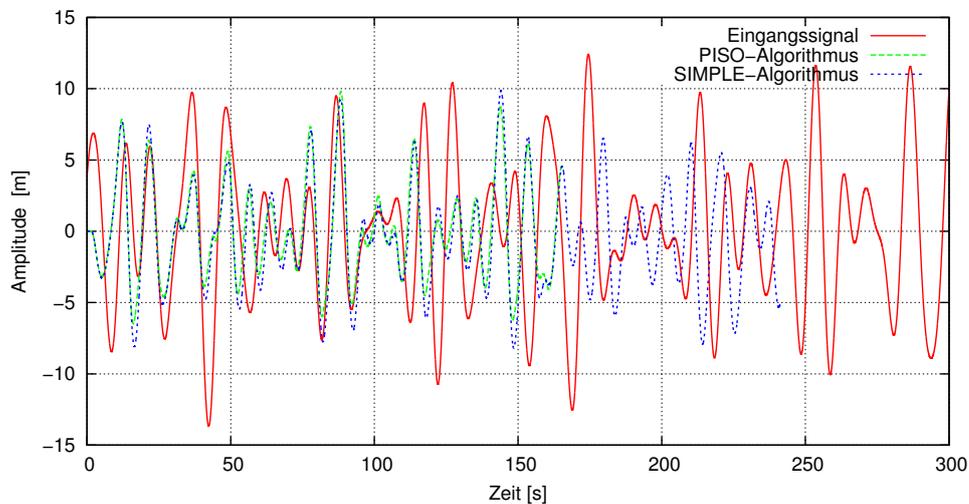
**Abbildung B.38:** Stampfbewegung für die sechste Elementarwelle mit  $A_z/\lambda = 1/200$



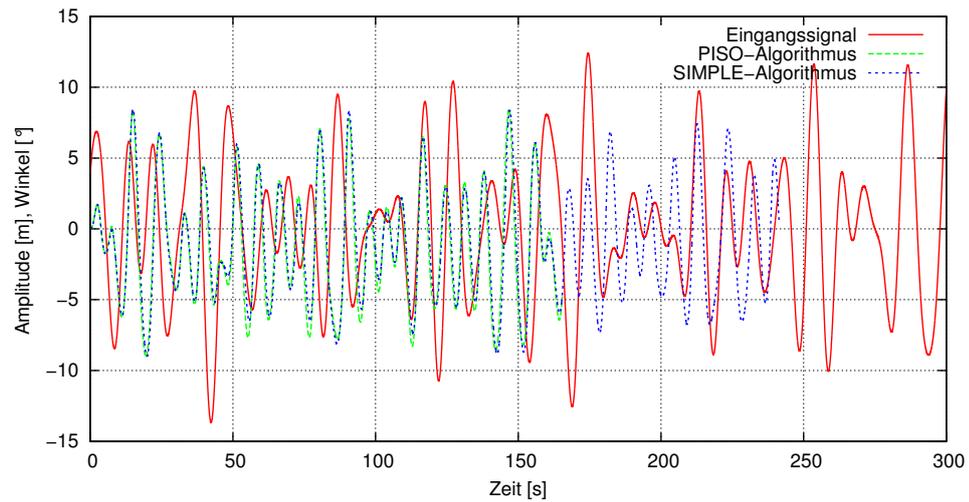
**Abbildung B.39:** Stampfbewegung für die siebte Elementarwelle mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$



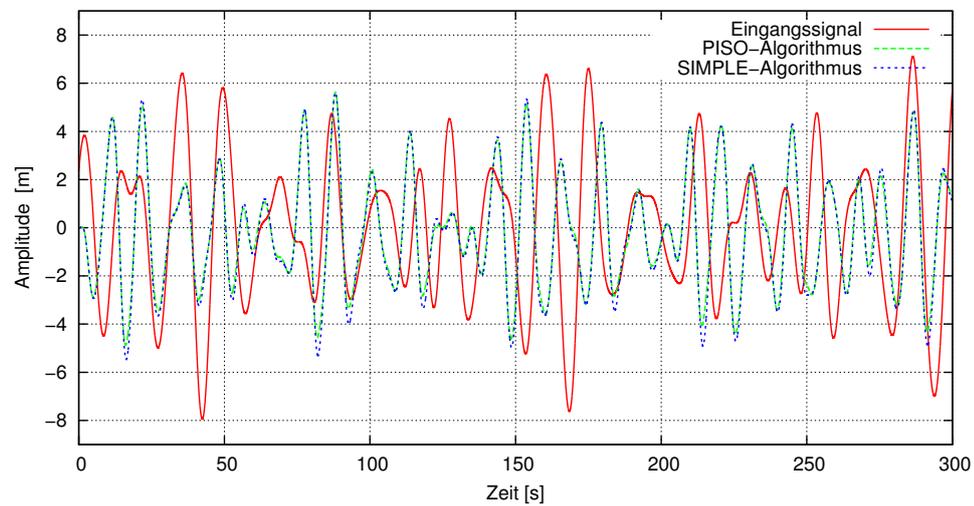
**Abbildung B.40:** Stampfbewegung für die achte Elementarwelle mit  $A_\zeta/\lambda = 1/200$



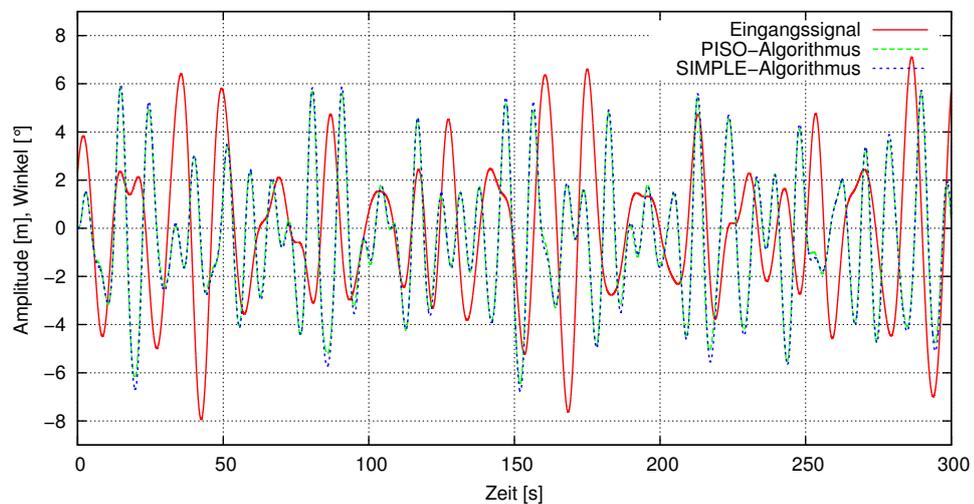
**Abbildung B.41:** Tauchbewegung für Seegangsspektrum mit  $A_\zeta = 2.5 \text{ m}$



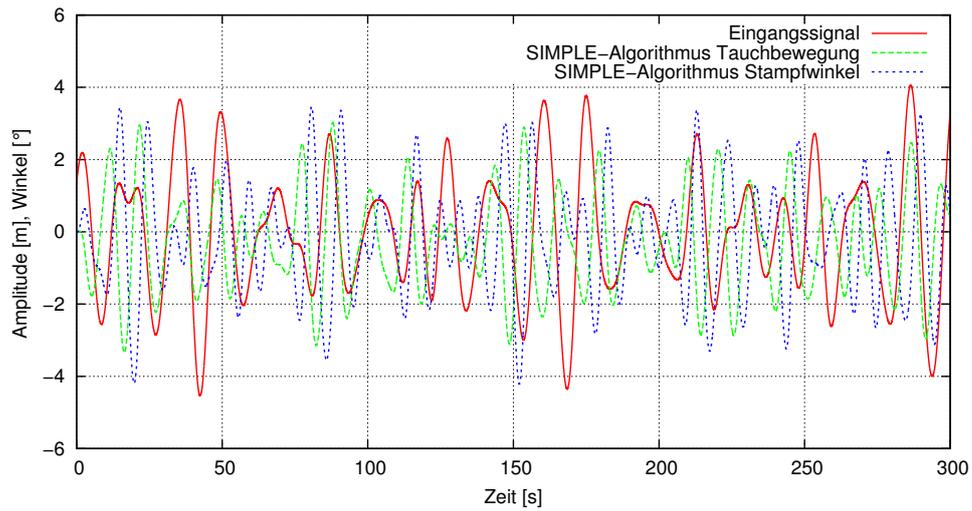
**Abbildung B.42:** Stampfbewegung für Seegangsspektrum mit  $A_\xi = 2.5 \text{ m}$



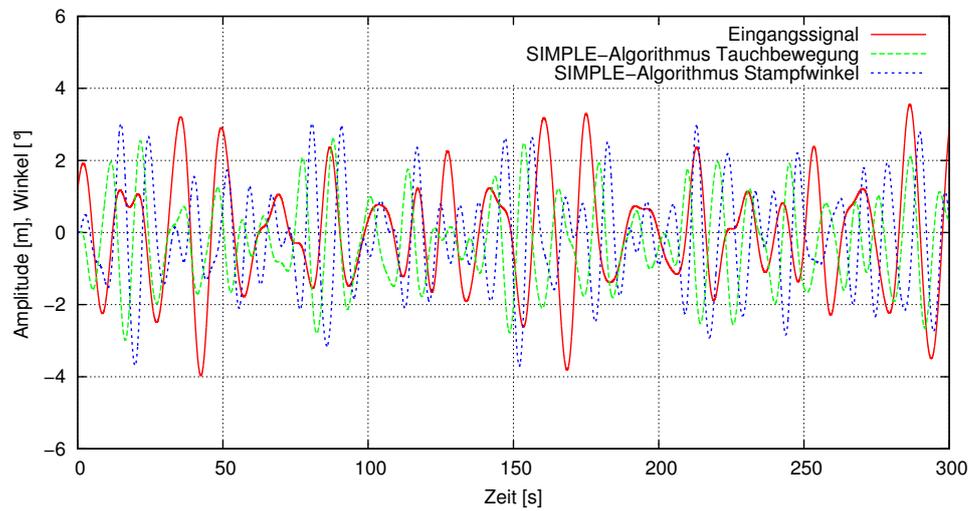
**Abbildung B.43:** Tauchbewegung für Seegangsspektrum mit  $A_\xi/\lambda = 1/200$



**Abbildung B.44:** Tauchbewegung für Spektrum und  $A_\xi/\lambda = 1/200$



**Abbildung B.45:** Tauch- und Stampfbewegung für Seegangsspektrum mit  $A_\zeta/\lambda = 1/350$



**Abbildung B.46:** Tauch- und Stampfbewegung für Seegangsspektrum mit  $A_\zeta/\lambda = 1/400$



---

# Literaturverzeichnis

- [1] E. Laurien, H. Oertel jr.: Numerische Strömungsmechanik. Vieweg + Teubner 2009, ISBN 978-3-8348-0533-1 3-540-12864-6.
- [2] M. Bestehorn: Hydrodynamik und Struckturbildng: Mit einer kurzen Einführung in die Kontinuumsmechanik. Springer-Verlag, 2006, ISBN 978-3-540-33796-6.
- [3] J. H. Ferziger, M. Perić: Numerische Strömungsmechanik. Springer-Verlag, 2008, ISBN 978-3-540-67586-0.
- [4] H. Oertel jr., M. Böhle, T. Reviol: Strömungsmechanik - Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethode - Softwarebeispiele. Springer-Verlag, 2011, ISBN 978-8348-1397-8
- [5] M. Schäfer: Numerik im Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999, ISBN 3-540-65391-0
- [6] L. Papula: Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 2. Vieweg. 2007, ISBN 978-3-8348-0304-7
- [7] V. Bertram: Practical Ship Hydrodynamics. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000, ISBN 0-7506-4851-1.
- [8] S. Krüger: Hydrostatik von Schiffen. Stand 2008. Technische Universität Hamburg-Harburg
- [9] H. Söding: Bewegung und Belastung der Schiffe im Seegang. Stand 1982. Technische Universität Hamburg-Harburg
- [10] E. Lehmann: Grundzüge des Schiffbaus, Band 1. Stand 2002. Technische Universität Hamburg-Harburg
- [11] S. Mai, C. Paesler, C. Zimmermann: Wellen und Seegang an Küsten und Küstenbauwerken. Stand 2004. Universität Hannover
- [12] R. Shivarama and E. P. Fahrenthold: Hamiltons's equations with Euler parameters for rigid body dynamics modeling [Chapter 3]. Stand 2004. University of Texas, Austin, TX 78712, USA, Department of Mechanical Engineering

- [13] G. F. Clauss, W. L. Kühnlein: Transient wave packets - an efficient technique for seakeeping tests of self-propelled models in oblique waves. Travemünde 1995. Berlin University of Technology
- [14] MARIN: CRS FORWARD SPEED BENCHMARK, Report No.: 21447-4-RD, February 2009.
- [15] [www.openfoam.com/features/linear-solvers.php](http://www.openfoam.com/features/linear-solvers.php)
- [16] [www.openfoam.org/docs/user/fvSchemes.php](http://www.openfoam.org/docs/user/fvSchemes.php)

# 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: **Bartonitz** Vorname: **Martin**

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

CFD-Berechnungen von Schiffsbewegungen in Seegang mittels Wellenpaketen

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