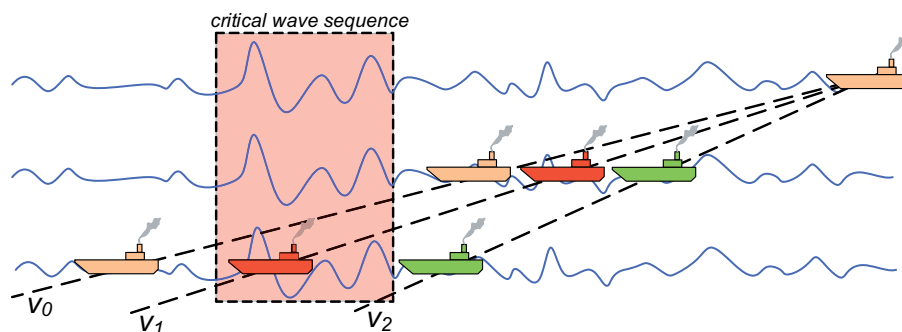


Abschlussbericht zum Teilvorhaben

Seegangsgenerierung und -analyse zur Simulation von Seegangslasten auf Schiffskörper im Seegang

des BMWI-Verbundprojekts

LaSSe – Lasten auf Schiffe im Seegang



Technische Universität Berlin,
den 21.12.2009

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Berlin,
Bereich Schiffs- und Meerestechnik

Förderkennzeichen: **03SX218C**

Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt *LaSSe*,
Seegangsgenerierung und -analyse zur Simulation von
Seegangslasten auf Schiffskörper im Seegang

Laufzeit: 01.01.2006 – 30.06.2009

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Günther F. Claus

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Sascha Kosleck
Dipl.-Ing. Daniel Testa
Dr.-Ing. Robert Stück
Dr.-Ing. Florian Stempinski

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Aufgabenstellung	11
2.1.	Projektteil 1: Bereitstellung von Wellensequenzen zur Untersuchung von quertreibenden Schiffen im Seegang.....	11
2.2.	Projektteil 2: Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose von Extremwellen aus Wellenzügen.....	12
2.3.	Projektteil 3: Numerische Modellierung von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellen.....	12
3	Laufzeit, Arbeitsplanung, Ablauf	13
3.1.	Laufzeit.....	13
3.2.	Arbeitsplanung.....	13
3.2.1.	zu Projektteil 1: Bereitstellung von Wellensequenzen zur Untersuchung von quertreibenden Schiffen im Seegang.....	13
3.2.2.	zu Projektteil 2: Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose von Extremwellen aus Wellenzügen.....	14
3.2.3.	zu Projektteil 3: Numerische Modellierung von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellen.....	15
3.2.3.1.	Approximation von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellenfeldern durch Überlagerung von Stokeswellen höherer Ordnung.....	15
3.2.3.2.	Berechnung der Druckverteilung in lang- und kurzkämmigen Seegängen durch Superposition von Wellenkomponenten unter Verwendung einer modifizierten linearen Theorie (<i>Adaptive Stretching</i>).....	15
3.3.	Ablauf.....	16

4	Vorbereitung /Zusammenarbeit	18
4.1.	Wissenschaftlich-technischer Stand.....	18
4.2.	Eigene Vorarbeiten / Technische Voraussetzungen.....	19
4.3.	Zusammenarbeit.....	19
5	Ergebnisse	21
5.1.	zu Projektteil 1: Bereitstellung von Wellensequenzen zur Untersuchung von quertreibenden Schiffen im Seegang.....	21
5.1.1.	Wellengenerierung und -analyse.....	21
5.1.1.1.	Seegangversuche.....	22
5.1.1.2.	Analyse und Validierung der Transformationsmethoden durch Vorversuche an der <i>HSVA</i>	23
5.1.1.3.	Schlussfolgerung.....	25
5.1.2.	Beschreibung des implementierten Verfahrens zur „ <i>PreSimulation</i> “.....	26
5.1.3.	Beschreibung des implementierten Verfahrens zur ‚ <i>ReSimulation</i> ‘.....	30
5.1.4.	‚WaveTUB‘.....	35
5.1.5.	Liste der Versuche.....	38
5.1.6.	Veröffentlichungen.....	38
5.2.	zu Projektteil 2: Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose von Extremwellen aus Wellenzügen.....	39
5.2.1.	‚ <i>2D-Wave Forecast</i> ‘ – Superpositions-Methode.....	39
5.2.2.	‚ <i>3D-Wave Forecast</i> ‘ – Superpositions-Methode.....	43

5.2.3.	„ <i>3D-Wave Forecast</i> “ – IFFT-Methode.....	46
5.2.4.	„ <i>Ship Motion Forecast</i> “.....	48
5.2.4.1.	Vorhersage von Begegnungswellenzügen.....	49
5.2.4.2.	Übertragungsfunktionen.....	52
5.2.4.3.	Berechnung der Schiffsbewegung.....	55
5.2.5.	Beispielrechnung.....	56
5.2.6.	Veröffentlichungen.....	60
5.3.	zu Projektteil 3: Numerische Modellierung von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellen.....	61
5.3.1.	Approximation von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellenfeldern durch Überlagerung von Stokeswellen höherer Ordnung.....	61
5.3.2.	Adaptive Stretching.....	69
5.3.2.1.	Einleitung.....	69
5.3.2.2.	Eigene Vorarbeiten.....	70
5.3.2.3.	Adaptive Stretching für reguläre Wellen.....	74
5.3.2.4.	Adaptive Stretching für irreguläre, langkämmige Seegänge.....	80
5.3.2.5.	Adaptive Stretching für irreguläre, kurzkämmige Seegänge.....	84
5.3.3.	Veröffentlichungen.....	87
6	Verwertbarkeit und Fortschritt anderer Stellen.....	88
6.1.	Verwertbarkeit.....	88
6.2.	Fortschritt anderer Stellen.....	88

7	Danksagung	89
8	Literatur	91
	Anhang A	103
	Übersicht über durchgeführte Versuche.....	103
	Anhang B	109
	Daten-CD.....	109

1 Einleitung

Wiederholt geraten Schiffe in schwere See und erleiden Schäden an Ladung und Schiffsstruktur, gleichzeitig ergibt sich eine erhebliche Gefährdung von Passagieren und Besatzung. Jüngste Beispiele zeigen vor allen Dingen folgende Schadensmuster:

1. Schäden an der Stahlstruktur (globale und lokale Schäden) bzw. Schäden an Ausrüstungsteilen durch extreme Lasten (Wasserdruck oder große Beschleunigungen) oder Risse aufgrund unzureichender Betriebsfestigkeit
2. Verletzte und/oder Schäden an Ausrüstung und Einrichtung infolge eines Quertreibens des Schiffes nach Antriebsverlust (z.B. der Kreuzfahrtschiffe "Bremen", "Rotterdam", "Grand Voyager", "Explorer", um nur einige zu nennen).

Innerhalb von *LaSSe* wurden Methoden entwickelt, die eine Bewertung der Gefährdung von Schiff, Mensch und Ladung durch große lokale oder globale Lasten sowie der Stabilität beim Quertreiben ermöglichen. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes ermöglichen eine Beurteilung der Gefährdung von quer zur See treibenden Schiffen – und somit die Gefährdung von Passagieren, Crew, Ladung, Ausrüstungs- und Einrichtungsgegenständen – sowie die qualifizierte Ermittlung von Seegangslasten sowohl durch Wasserdruckbelastung als auch durch Beschleunigungen.

Die Entwicklungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, wie wichtig die Fähigkeit der direkten Berechnung und Bewertung von Schiffseigenschaften für die Optimierung von Entwürfen und damit für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Schiffbauindustrie ist. Nur auf der Basis von Berechnungsmethoden und Werkzeugen, die eine direkte Berechnung erlauben, lässt sich ein Entwurf (langfristig) als Gesamtsystem optimieren. D.h. die Leistungsfähigkeit des Entwurfes für die antizipierten Einsatzbedingungen (Fahrgebiet, Ladungsaufkommen, Zuverlässigkeit in extremen Bedingungen, Komfort, etc.) über die zu erwartende Lebensdauer bewerten.

In dem vorangegangenen Forschungsvorhaben *SinSee* wurde eine Simulations- und Versuchsmethodik entwickelt, mit der das Kenterverhalten in extremem Seegang untersucht wurde. Hierbei lag der Fokus auf der Bewertung der Sicherheit intakter Schiffe in schwerem Seegang bezüglich extremer Rollwinkel sowie der Berechnung von globalen Schnittlasten zur Dimensionierung der Struktur. Das Vorhaben ist mit großem Erfolg bearbeitet worden – die entwickelten Methoden und Werkzeuge wurden erfolgreich in der Praxis integriert.

In *LaSSe* wurde diese Arbeit konsequent weitergeführt. Der Fokus lag dabei auf der Bewertung der Sicherheit von Schiff, Ladung und Personen an Bord in der sogenannten "dead-ship-condition" (treibendes Schiff nach Ausfall des Antriebes) sowie der Bestimmung der hydrodynamischen Lastverteilung auf der Schiffsaußenhaut.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden in Kooperation von *FSG*, *HSVA*, *OWS*, *TUB* und *TUHH*, aufbauend auf den Ergebnissen aus *SinSee*, folgende Teilziele bearbeitet:

- Mit Hilfe eines zusätzlichen Wellenradars wurden die 3-dimensionalen Wellenbilder in der Umgebung eines Schiffes erfasst. Eine Transformationsroutine prognostiziert

die Wellenauslenkung am Schiff mit dem Ziel der kurzfristigen Identifikation gefährlicher Einzelwellen und Wellengruppen.

- Eine Approximationsroutine bestimmt das nicht-lineare Wellenpotential des irregulären Seegangs, auf dessen Basis die Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke an der Aussenhaut bestimmt werden. Die Methoden wurden mit Modellversuchen und CFD-Berechnungen validiert.
- Eine Schnittstelle wurde implementiert, mit der die o.g. Seegangslasten in ein FEM-Programm übergeben werden, sodass, parallel zu den Seegangssimulationen, FE-Rechnungen durchgeführt werden konnten, die lokale und globale strukturelle Beanspruchungen ermitteln.
- In Modellversuchen wurden sowohl Messungen von Seegangslasten in vorliegender See („head seas“) als auch Messungen kombinierter Wind- und Seegangslasten auf das quertreibende Schiff durchgeführt („dead-ship-condition“). Der Fokus lag hierbei insbesondere auf Rollbewegungen und Außenhautlasten.
- Auf Basis von Versuchsergebnissen und Simulationen wurden Bemessungsmaßstäbe für die Sicherheit von Schiffen abgeleitet.

Der Ansatz direkter Berechnung von Seegangslasten wurden konsequent weiter verfolgt mit dem langfristigen Ziel, das System „Schiff“ im Rahmen des Entwurfsprozesses vollständig und mit allen Risiken beschreiben und bewerten zu können. Gleichzeitig wurden die Grundlagen für Strategien erarbeitet, mit denen es der Crew von Schiffen ermöglicht wird, Gefahren durch z.B. Freakwaves im Schiffsbetrieb abzuwenden oder zu beherrschen.

Das Teilvorhaben der *TUB* verfolgte dabei im wesentlichen drei Hauptziele:

1. Generierung extremer Wellengruppen zur Untersuchung quertreibender Schiffe im Wellenkanal,
2. Entwicklung eines Prognoseverfahrens zur Vorhersage von gefährlichen Einzelwellen und Wellengruppen aus Radarmessungen der Meeresoberfläche und
3. Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Vorhersage von Druck- und Geschwindigkeitsfeldern in Oberflächennähe steiler Wellengruppen als Grundlage für die Berechnung von globalen und lokalen Lasten auf die Außenhaut des Schiffes im Seegang.

Zur Umsetzung wurde auf Verfahren und Versuchsergebnisse des Vorgängerprojektes *Sinsee* zurückgegriffen. Zusätzlich wurden, gemeinsam mit den Projektpartnern, neue Versuchsreihen durchgeführt. Das Verfahren zur Seegangsprognose wurde speziell in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner *OWS* entwickelt, welcher die Radarmessungen und die daraus resultierenden Seegangsinformationen lieferte. Die Ergebnisse der Untersuchungen von Druck- und Geschwindigkeitsfeldern flossen direkt in die Manöver- und Seegangssimulationsverfahren der Projektpartner *FSG* sowie der *TUHH* ein.

2 Aufgabenstellung

Die Ziele des Verbundvorhabens werden ausführlich in dem Gesamt-Abschlußbericht dargestellt. Daher wird in diesem Bericht nur auf die Aufgaben des Teilprojektes "Seegangsgenerierung und -analyse zur Simulation von Seegangslasten auf Schiffskörper im Seegang" eingegangen.

Die Hauptaufgaben dieses Teilvorhabens bestehen in der Bereitstellung von Seegängen – sowohl versuchstechnisch als auch in der Analyse, sowie der Entwicklung eines Prognoseverfahrens zur Vorhersage von gefährlichen Einzelwellen und Wellengruppen aus Radarmessungen der Meeresoberfläche und der Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Vorhersage von Druck- und Geschwindigkeitsfeldern in Oberflächennähe steiler Wellengruppen.

2.1. Projektteil 1: Bereitstellung von Wellensequenzen zur Untersuchung von quertreibenden Schiffen im Seegang

Das im Projekt *SinSee* entwickelte Verfahren zur Generierung maßgeschneiderter Wellenzüge wird erweitert, um auch driftende – d.h. Schiffe mit langsamer, unsteter Geschwindigkeit querliegend zur Hauptwellenrichtung – an vordefinierter Stelle zu erfassen. Für die vom Projektpartner *HSVA* durchgeführten experimentellen Untersuchungen von lokalen Drücken ist hier eine erhöhte Präzision der Wellengenerierung notwendig. Im einzelnen sind folgende Schritte durchzuführen:

- Reguläre steile Wellen (Stokes-Wellen) für Voruntersuchungen
- Reguläre Wellengruppen mit extremen, in Schiffsnähe auftretenden Einzelwellen
- Irreguläre Seegänge mit eingelagerten, in Schiffsnähe auftretenden, hohen Wellengruppen

Die Steuersignale mit transienten Ereignissen (hohe Einzelwellen, Wellengruppen etc.) werden durch Rückrechnung der gewünschten Registrierung am quertreibenden Schiff umgerechnet und derart aufbereitet, dass das Schiff an vordefinierter Stelle exakt „getroffen“ wird. Dies kann nur mit Berechnungsverfahren geschehen, die die nichtlineare Wellenausbreitung berücksichtigen. Extremsituationen können so gezielt experimentell erzeugt und untersucht werden.

Eine Schnittstelle soll ferner ermöglichen, die Wellenzüge mit der Simulations-Software der Projektpartner auszutauschen. Zusammen mit den Partnern *FSG* und *HSVA* werden so Besonderheiten aus der Simulation – z.B. unerwartete Kenterfälle oder lokale Schadensfälle – gezielt experimentell nachgestellt, analysiert und validiert.

2.2. Projektteil 2: Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose von Extremwellen aus Wellenzügen

In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner *OWS* sollen aus Serien gemessener Radarbilder Wellenkonturen, d.h. Wasserspiegelauslenkungen im Ortsbereich, abgeleitet werden, aus denen eine Vorausberechnung von spontanen Überlagerungen unauffälliger Einzelwellen zu plötzlichen Extremwellen erfolgt. Dieses Verfahren berücksichtigt die nichtlineare Dispersion der Wellenkomponenten und stellt eine inverse Anwendung der im Aufgabenteil 1 weiterentwickelten Transformation zwischen Orts- und Zeitbereich sowie zwischen festem und bewegtem Referenzsystem dar.

Die Transformationsalgorithmen werden zunächst für langkämmige Seegänge entwickelt und mit Hilfe der Wellenkanäle der *TUB* experimentell validiert. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner *OWS* sollen sie anschließend auf die Anwendung für richtungsabhängige, kurzkämmige Seegänge erweitert werden.

2.3. Projektteil 3: Numerische Modellierung von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellen

Während das Stabilitätsverhalten des Schiffes im Seegang entscheidend von der Wellenauslenkung am Schiff dominiert wird, sind für die hydrodynamischen Lasten am Schiff genaue Kenntnisse über die in der Welle herrschenden Druckfelder in Oberflächennähe notwendig. Die bislang in der Simulation eingesetzte Modellierung irregulärer Seegänge durch eine Überlagerung vieler harmonischer Wellenkomponenten weist in Oberflächennähe – besonders im Wellenberg – Ungenauigkeiten auf, die keine genauen Aussagen über die Wellenkinematik zulassen. Besonders zur Modellierung von extremen Seegängen ist daher der Einsatz von Wellentheorien höherer Ordnung bzw. von Einzelwellentheorien geboten. Diese bieten bislang nur eine geschlossene Lösung für die Modellierung regulärer Wellen. Ziel ist es, durch ein Approximationsverfahren diese Theorien für die Simulation von hohen, irregulären Wellensequenzen nutzbar zu machen. Dies soll ermöglichen, die Druckfelder sowie Partikelgeschwindigkeiten und -beschleunigungen des Initialwellenfeldes bis in den Wellenkamm akkurat abzubilden.

Dieses Verfahren erlaubt ebenfalls eine genauere Simulation der Belastung von Propeller, Ruder und Flossenstabilisatoren, die im starken Seegang in Oberflächennähe wirken und ggf. austauschen. Das Verfahren zur Gewinnung der dynamischen Wellengrößen wird so implementiert, dass es an die Simulations-Software der Projektpartner gekoppelt (mit den bekannten, simulierten und gemessenen Schiffsbewegungen) eine Abschätzung der globalen und lokalen Belastungen auf den Schiffsrumpf zulässt. Eine Schnittstelle zu den FEM-Systemen des Projektpartners *FSG* wird implementiert.

Im Rahmen der Methodenentwicklung muss das Verfahren der Approximation systematisch validiert und verifiziert werden. Dies soll einerseits mit gezielten Modellversuchen im Wellenkanal erfolgen, andererseits mit CFD-Rechnungen (Volume-of-Fluid-Verfahren).

3 Laufzeit, Arbeitsplanung, Ablauf

3.1. Laufzeit

Die ursprünglich geplante Laufzeit des Projekts belief sich auf den Zeitraum vom 01.01.2006 bis 31.12.2008. Aufgrund von Verzögerungen bei den Modellversuchen (Modellversuche bei der *HSVA* konnten erst 6 Monate später als geplant beginnen) musste der Arbeitsplan bereits im August 2007 neu strukturiert werden. In Folge dessen hat sich die *TUB* zusammen mit den Projektpartnern *FSG* sowie *TUHH* dazu entschlossen, eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 30.06.2009 zu beantragen. Der Antrag auf kostenneutrale Verlängerung wurde bewilligt.

3.2. Arbeitsplanung

Im Laufe des Projekts ergaben sich für die drei Aufgabenteile geringfügige Veränderungen. So wurden einige Teilaufgaben modifiziert, bzw. erweitert. Zusätzlich ergaben sich speziell zu Projektteil 2 und 3 Erweiterungen zum ursprünglichen Aufgabenpaket. Somit ergab sich für dieses Teilvorhaben folgender, nach Projektteilen gegliederter Arbeitsplan:

3.2.1. zu Projektteil 1: Bereitstellung von Wellensequenzen zur Untersuchung von quertreibenden Schiffen im Seegang

1. *Pre-Simulation* (,PreSim‘) / *Vorbereitung der Versuchsseegänge*:

Aufbereitung von numerisch simulierten Seegängen (,ROLLS‘, *FSG*) und Rückrechnung von am Schiff gemessenen Wellenauslenkung in ortsfeste Spektren zur Generierung von Steuersignalen für die Modellversuche

2. *Generierung von „maßgeschneiderten“ Versuchsseegängen*:

Generierung von vorab numerisch simulierten irregulären Seegängen (,PreSim‘) zur Validierung der Simulationen mittels Modellversuchen

Generierung von irregulären Seegängen mit eindeutig definierten Parametern und in Schiffsnähe auftretenden hohen Wellengruppen oder Einzelwellen

3. *Validierung der Seegangsgenerierung*:

Numerische Validierung sowie experimentelle Validierung der generierten Seegänge im Seegangsbecken der *TUB*

4. *Aufmessen der generierten Seegänge*:

Aufmessen der während der Modellversuche an der *HSVA* generierten Seegänge zur Aufbereitung von Versuchsdaten für nachträgliche numerische Simulationen (,ReSim‘)

5. *Re-Simulation* (*,ReSim'*) / *Nachbearbeitung der Versuchsseegänge:*

Aufbereitung der während der Versuche gemessenen Seegänge und Umrechnung der ortsfesten Spektren in zeitabhängige Wellenregistrierungen am Ort des fahrenden Schiffs (Umkehrung des unter Punkt 1 genannten Verfahrens)

3.2.2. zu Projektteil 2: Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose von Extremwellen aus Wellenzügen

1. *Entwicklung von Transformationsalgorithmen für langkämmige Seegänge* (*,2D-Wave Forecast'*):

Ortsbereichsmessungen des Wellenfeldes zu einem definierten Zeitpunkt (Snapshot der Wasseroberfläche)

Transformation der Ortsbereichsinformationen in den Frequenzbereich (Berechnung von Spektren)

Transformation vom Frequenzbereich in den Zeitbereich zur Vorhersage von Wellenregistrierungen an einer beliebigen Position

2. *Generierung von Seegängen und Vorhersage von Wellenregistrierungen:*

Generierung und Aufmessung von irregulären Seegängen im Ortsbereich (Snapshots) und Zeitbereich (Wellenregistrierungen/Pegelmessungen)

Anwendung der unter Punkt 1 entwickelten Verfahren zur Transformation der Ortsbereichsinformation in den Zeitbereich (Vorhersage von Wellenregistrierungen)

3. *Validierung des ,2D-Wave Forecast' Routine für langkämmige Seegänge im Wellenkanal der TUB:*

Validierung der unter mit der *,2D-Wave Forecast'* Routine vorhergesagten Wellenregistrierungen mit den unter Punkt 1 gemessenen Wellenregistrierungen

4. *Weiterentwicklung des Verfahrens für kurzkämmige Seegänge* (*,3D-Wave Forecast'*):

Weiterentwicklung des unter Punkt 2 genannten Verfahrens (*,2D-Wave Forecast'*) für die Verarbeitung multidirektionaler Seegangsinformationen

Vorhersage 3-dimensionaler kurzkämmiger Seegänge/Wellenfelder im Radarbereich des Schiffs

Vorhersage resultierender Begegnungswellenzüge am Ort des Schiffs

5. *Entwicklung eines Verfahrens zur Vorhersage von Schiffsbewegungen* (*,Ship Motion Forecast'*):

Entwicklung eines Verfahrens bei dem die mittels *,3D-Wave Forecast'* berechneten Begegnungswellenzüge als Input für die Vorhersage von aus Welle/Struktur-Interaktion resultierenden Schiffsbewegungen dienen

6. Validierung der ‚3D-Wave Forecast‘ sowie der ‚Ship Motion Forecast‘ Routinen:

Validierung der entwickelten Routinen mit Großausführungsmessungen

3.2.3. zu Projektteil 3: Numerische Modellierung von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellen

3.2.3.1. Approximation von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellenfeldern durch Überlagerung von Stokeswellen höherer Ordnung

1. *Entwicklung eines Approximationsverfahrens*

Entwicklung eines Optimierungsalgorithmus mit dem die Kinematik unter hohen, irregulären Wellensequenzen mittels Überlagerung von Stokeswellen höherer Ordnung approximiert wird

2. *Generieren und Aufmessen der Kinematik hoher, irregulärer Wellensequenzen im Wellenkanal der TUB*

Generieren von Seegängen mit hohen, irregulären Einzelwellen (auch Extremwellen) im kleinen Wellenkanal der TUB und Messung des Seegangs sowie der Wellenkinematik mittels Laser-Doppler-Velocimeter

3. *Validierung der Berechnungen aus Punkt 1 mit den Messungen aus Punkt 2*

3.2.3.2. Berechnung der Druckverteilung in lang- und kurzkämmigen Seegängen durch Superposition von Wellenkomponenten unter Verwendung einer modifizierten linearen Theorie (*Adaptive Stretching*)

1. *Entwicklung eines ‚Adaptive Stretching Terms‘ zur Modifizierung der linearen Wellentheorie in Bezug auf die Berechnung des dynamischen Drucks*

Entwicklung eines ‚Adaptive Stretching Terms‘ zur Modifizierung der Berechnung des dynamischen Drucks mittels linearer Wellentheorie für den Bereich des Wellenbergs

2. *Generieren und Aufmessen der Druckverteilung unter regulären Wellen im Seegangsbecken der TUB*

Generieren von regulären Wellen verschiedener Höhe und Frequenz im Seegangsbecken der TUB

Aufmessen der verschiedenen Wellen, insbesondere der Druckverteilung unterhalb der dieser Wellen

3. *Weiterentwicklung des unter Punkt 1 genannten Verfahrens zur Berechnung von Drücken unter irregulären lang- und kurzkämmigen Seegängen*

Weiterentwicklung des unter Punkt 1 genannten ‚Adaptive Stretching Terms‘ für die Berechnung der Druckverteilung unterhalb irregulärer, langkämmiger und kurzkämmiger Seegänge

Berechnung der Druckverteilung in irregulären, langkämmigen Seegängen durch Superposition der Druckverteilungen unter linearen harmonischen Einzelkomponenten

Berechnung der Druckverteilung in irregulären, kurzkämmigen Seegängen durch Superposition der Druckverteilungen unter linearen harmonischen Einzelkomponenten unter Berücksichtigung der verschiedenen Welleneinfallswinkel

4. Implementierung des entwickelten Algorithmus als Subroutine in das im Projektteil 2 entwickelte Programmpaket ‚3D Wave and Ship Motion Forecast‘

Der entwickelte Algorithmus zur Berechnung der Druckverteilung unterhalb eines Wellenfeldes wird als Subroutine dem in Projektteil 2 entwickelten Programmpaket ‚3D Wave and Ship Motion Forecast‘ hinzugefügt. Dadurch lässt sich im Nachlauf an die Vorhersage des Wellenfeldes im Nahbereich des Schiffs auch die Druckverteilung im Nahbereich sowie an der Außenhülle vorhersagen.

3.3. Ablauf

Der ursprüngliche, zu Projektbeginn erstellte Balkenplan für den Projektablauf ist in Abb. 1 dargestellt.

Projektteil	Monat	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	31-33	34-36
1	Entwicklung und Neuimplementierung der Wellengenerierung	■	■	■									
	Experimentelle Validierung				■								
	Durchführung von Versuchen (HSVA)					■	■	■	■	■	■	■	■
	Schnittstellenerstellung					■	■						
2	Entwicklung der Transformationsroutinen						■	■	■	■			
	Aufmessung von Wellenzügen im Orts- und Zeitbereich									■	■	■	■
	Ausweitung des Verfahrens auf den 3-D Fall												■
3	Entwicklung und Implementierung des Approximationsverfahrens	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	Kalibrierung und Verifizierung mit CFD- Rechnungen				■	■	■	■	■	■	■	■	
	Experimentelle Validierung durch Versuche											■	■
	Dokumentation Abstimmung mit Projektpartner Projektpartnern, Administration	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Anfertigung des Abschlussberichtes												■

Abb. 1: Ursprünglicher Balkenplan für den Projektablauf

Abb. 2 zeigt den endgültigen Balkenplan des Projektablaufs inklusive aller sich ergebenden Änderungen.

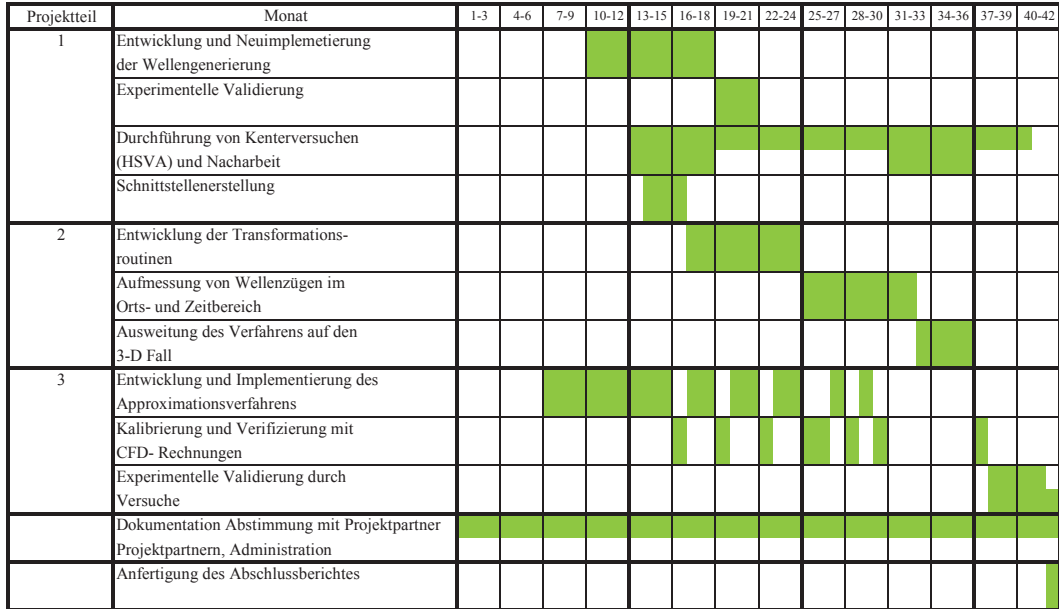


Abb. 2: Balkenplan mit Berücksichtigung aller Änderungen im Projektablauf

4 Vorbereitung /Zusammenarbeit

4.1. Wissenschaftlich-technischer Stand

Für die Generierung deterministischer anwendungsorientierter Modellseegänge ist die Technik transientser Wellenpakete von maßgebender Bedeutung. Die Grundlagen zur Beschreibung niedriger Wellenpakete von Davis, M. C. und Zarnick, E. E. (1964) wurden von Takezawa, S. und Jingu, N. (1974) sowie Takezawa, S. und Hirayama, T. (1976) erweitert. Darauf aufbauend beschreiben Bergmann, J. (1985) sowie Claus, G. und Kühnlein, W. (1995a) ihre Ausbreitung im Wellenkanal. Kühnlein, W. (1997) entwickelte ein halbempirisches Verfahren zur Generierung und Beschreibung hoher transientser Wellenpakete, Claus, G. F. und Steinhagen, U. (2000) entwickelten - aufbauend auf den Herleitungen von Wu, G. und Eatock-Taylor, R. (1995) - ein Verfahren zur Analyse solcher Wellenzüge in einem numerischen Wellenkanal. Die Schwierigkeiten bei der versuchstechnischen Erzeugung regulärer Wellen, insbesondere höherer regulärer Wellenzüge sind vielfach beschrieben. Allgemein bekannt sind die Arbeiten von Benjamin, T. B. und Feir, J. E. (1967), aus denen hervorgeht, dass bei harmonischer Erregung durch einen Wellenerzeuger benachbarte Frequenzen der Hauptfrequenzen entstehen, die mit zunehmender Entfernung vom Wellenblatt an Ausprägung gewinnen, womit der Wellenzug stark gestört in Erscheinung tritt. Interaktionsphänomene werden u. a. von Benney, D. J. (1962) beschrieben, die auch bei der Überlagerung von regulären Wellengruppen mit Wellenpaketen von besonderer Bedeutung sind. Die meisten genannten Werke haben gemeinsam, dass sie einen eher theoretischen bzw. beschreibenden Charakter aufweisen, sich jedoch weniger der Wellengenerierung in einem Versuchskanal widmen. Zur Erzeugung hoher Stokes-Wellen höherer Ordnung beschreibt Schäffer, H. A. (1996) Verfahren zur Erzeugung solcher Wellengruppen unter Berücksichtigung der höheren harmonischen Anteile, wobei er sich auf ein als Kolben arbeitendes Wellenblatt (Piston) bezieht. Untersuchungen zur Interaktion von Wellengruppen innerhalb eines Zufallsseegangs wurden eingehend beschrieben, so in Kjeldsen, S. P. und Myrhaug, D. (1984), Stansberg, C. (1995), Kjeldsen, Drennan, und Skafel (2000) u.a.. Bislang fehlt eine konkrete, umfassende Anwendung der Erkenntnisse für die Generierung von problemangepassten Wellengruppen in einem physikalischen Tank. Auf diesem Spezialgebiet hat die *TUB* über Jahre Erfahrungen gesammelt, die im folgenden Unterabschnitt skizziert werden.

Die Techniken zur Generierung und Analyse niedriger, linear beschreibbarer transientser Wellenpakete wurden von Claus and Kühnlein (1995b), aufbauend auf den oben beschriebenen Arbeiten weiterentwickelt. Dazu gehört insbesondere auch die Transformation des gemessenen oder berechneten Wellenzugs auf stationäre oder bewegte Meßstellen. Diese Techniken wurden auf hohe transiente Wellengruppen sowie reguläre Wellen erweitert (Claus, G. F. und Kühnlein, W. L. (1997) sowie Claus, G. und Hennig, J. (2001b)), so dass auch hohe Wellengruppen an stationären oder bewegten Meßstellen berechenbar sind. Somit wird eine Zuordnung von Wellenerregung zu Schiffsantwort ermöglicht. In einem numerischen Wellenkanal lassen sich unter Verwendung einer Optimierungsroutine - aufbauend auf einem Verfahren von Claus, G. F. und Steinhagen, U. (1999) und Claus, G., Steinhagen, U., und Pakozdi, C. (2001) - hohe Zufallsseegänge ausgehend von der Wellenblattbewegung eines Wellenerzeugers berechnen. Erste Ansätze zur versuchs-

technischen Umsetzung der gezielten Einbettung hoher Wellengruppen innerhalb eines Zufallsseegangs mit definierten statistischen Eigenschaften erfolgte im Forschungsvorhaben **ROLL-S** (Claus, G. und Hennig, J. (2001a)). Diese Technik wurde im Folgevorhaben **SinSee** weiterentwickelt. Weiterhin wurde auf folgende für das beantragte Teilvorhaben wichtige Vorarbeiten zurückgegriffen:

- Entwicklung von Mess- und Steuersystemen für Seegangversuche
- Entwicklung von Systemen zur Ansteuerung von Wellenerzeugern sowie zum Entwurf komplexer deterministischer Modellseegänge
- Erfahrung bei der Messung und Auswertung von Messungen im Seegang, insbesondere auch bei Roll- und Kenterversuchen (siehe Vorgänger-Projekt **SinSee**)

4.2. Eigene Vorarbeiten / Technische Voraussetzungen

Die *TUB* besitzt umfangreiche Software zum Steuern, Messen und Auswerten von Seegängen. Da bei der Entwicklung der Software stets ein besonderes Augenmerk auf Kompatibilität gelegt wurde kann sie sehr einfach auf die meisten Systeme zur Wellengenerierung in Versuchsanlagen adaptiert werden. Im Rahmen der Vorgängerprojekte **ROLL-S** und **SinSee** wurde diese Mess- und Steuersoftware bereits erfolgreich im Seegangsbecken der *HSV A* integriert.

Die *TUB* besitzt desweiteren portable Hardware zur Seegangsmessung, wie z.B. Laptops mit Messkarten, Induktive Pegelmesser sowie Ultraschallsonden. Durch die erfolgreiche Anpassung der *TUB*-Mess- und Steuersoftware für das Seegangsbecken der *HSV A* konnte die notwendige Hardware zur Seegangsmessung problemlos angeschlossen und jederzeit eingesetzt werden.

Somit stand bereits zur Projektbeginn ein leistungsstarkes System zur Erzeugung und Messung maßgeschneiderter Seegänge zur Verfügung.

4.3. Zusammenarbeit

Es ist hervorzuheben, dass während der gesamten Kooperationsphase wiederholt Rücksprachen mit den Partnern stattfanden, sodass eine kontinuierliche Anpassung der Versuchsparameter, Simulationsparameter, etc. gewährleistet wurde. Die Verfahren zur Seegangsgenerierung wurden von der *TUB* allein in Vorversuchen validiert. Die Seegangversuche erfolgten in Kooperation von *TUB*, *HSV A* und *FSG*. Die Abstimmung der Teilvorhaben untereinander wird in den abgestimmten Balkenplänen der Einzelvorhaben sowie des Verbundvorhabens deutlich.

Explizite Zusammenarbeit der *TUB* mit den einzelnen Partnern:

- *HSV A*: Wellengenerierung, Seegangversuche, Seegangsmessung

- *FSG*: Vorbereitung und Auswertung der Versuche, Validierung numerischer Simulationen, Validierung ‚*Ship Motion Forecast*‘ mit Großausführungsmessungen
- *OWS*: Aufbereitung von in der Natur gemessenen Seegangdaten (Radarmessungen), Validierung ‚*3D-Wave Forecast*‘

5 Ergebnisse

5.1. zu Projektteil 1: Bereitstellung von Wellensequenzen zur Untersuchung von quertreibenden Schiffen im Seegang

5.1.1. Wellengenerierung und -analyse

Für die versuchstechnische Generierung und Analyse extremer Seegangsbedingungen wurde eine bereits in *SinSee* entwickelte nichtlineare modifizierte Theorie weiterentwickelt und im Wellenkanal der *HSVA* angewendet. Das Verfahren beginnt mit einem Wellenzug, der linear beschreibbar ist. Wird dieser Wellenzug mit linearer Wellentheorie auf eine andere Position im Tank (z.B. $x = 130,22$ m) umgerechnet, werden signifikante Unterschiede zum tatsächlich gemessenen Wellenzug deutlich. Die Anwendung linearer Wellentheorie nach AIRY erlaubt die Implementierung einer schnellen iterativen Methode und deren praktische Anwendung für Modellversuche. Der Generierung steiler Wellenzüge wird durch die Betrachtung nichtlinearer Terme (STOKES-Wellentheorie dritter Ordnung) Rechnung getragen. Hierbei wird für jeden Ortsschritt die tatsächliche, momentane Auslenkung des Wellenzugs – repräsentiert durch die Einhüllende des Wellenzugs – zur Berechnung der nichtlinearen Geschwindigkeit der Welle in Betracht gezogen.

Eine Hauptanwendung des Verfahrens liegt in der Generierung maßgeschneiderter deterministischer Wellenzüge im Versuchskanal. Für die Untersuchung nichtlinearer Wechselwirkungen zwischen Welle und Struktur wird hierfür ein Zielort definiert, an dem der Wellenzug eine vorgegebene Form aufweisen, bzw. definierten Parametern genügen soll. Eine so vorgegebene Zeitreihe wird unter Verwendung der modifizierten nichtlinearen Theorie auf die Position des Wellenerzeugers umgerechnet. Aus dem am Wellenblatt vorliegenden Wellenzug werden durch Multiplikation mit verschiedenen Übertragungsfunktionen entsprechende Steuersignale für den Wellenerzeuger berechnet. Dieses Verfahren wird ausführlich in Claus, G. und Hennig, J. (2003) sowie Hennig, J. (2005) erläutert.

Mit dem hergeleiteten Verfahren können verschiedene Arten deterministischer Wellensequenzen generiert werden:

- transiente Wellenpakete und Extremwellen
- realistische Seegänge mit eingelagerten gefährlichen Wellensequenzen
- Gruppen von Extremwellen wie z.B. sogenannte ‚Three Sisters‘ – Wellensequenz mit drei hohen Wellenbergen – umgeben von regulären Wellen oder irregulärem Seegang
- maßstabsgetreue Realisierung von in der Natur gemessenen Wellensequenzen im Versuchskanal

Der deterministische Ansatz, der die Kenntnis des Wellenzugs zu jeder Zeit und an jedem Ort ermöglicht, erlaubt die Durchführung vollständig automatisierter deterministischer See-

gangsversuche. Das Verfahren kann ebenfalls für die Transformation stationär gemessener Wellensequenzen in das bewegte Bezugssystem des fahrenden Schiffes eingesetzt werden.

5.1.1.1. Seegangversuche

Es werden systematische Versuche mit folgenden Schiffsmodellen durchgeführt:

1. *DFDS RO-RO Frachtschiff (Einschrauber)*

Im Juni 2007 fanden Versuche mit dem DFDS RO-RO Frachtschiff statt, wobei Messungen in vorlichem sowie achterlichem Seegang durchgeführt wurden.

Im Oktober 2007 fanden Versuche mit dem DFDS RO-RO Frachtschiff statt, wobei Messungen mit dem quertreibenden Schiff durchgeführt wurden.

2. *RO-PAX Fähre ‚Norröna‘*

Im März 2008 fanden Versuche mit der ‚Norröna‘ statt, wobei Messungen in vorlichem sowie achterlichem Seegang durchgeführt wurden.

Im Mai 2008 fanden Versuche mit der ‚Norröna‘ statt, wobei Messungen mit dem quertreibenden Schiff durchgeführt wurden.

Für jede der Versuchsreihen wurden im Vorlauf Seegänge auf Basis vorab durchgeführter Simulationen (*FSG / ROLL-S*) generiert. Datengrundlage für die Erzeugung von Steuersignalen waren während der Simulation am Ort des Schiffs registrierte Oberflächenauslenkungen. Diese Messungen wurden aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert und auf den Ort des Wellenblatts umgerechnet. Unter Einbeziehung der Übertragungsfunktionen der Wellenmaschine und Rücktransformation in den Zeitbereich ergeben sich Steuersignale für den jeweils gesuchten Seegang. Desweiteren wurden für jede Versuchsreihe vor Ort – je nach Bedarf – zusätzliche maßgeschneiderte Seegänge erzeugt.

Tatsächlich wurde der Großteil der untersuchten Seegänge erst direkt vor Ort, während der Versuche, in Absprache mit den Projektpartnern generiert. Aufgrund dessen hat sich sehr schnell erwiesen, dass es sinnvoller ist das numerische Simulationstool des Projektpartners *FSG*, nicht wie ursprünglich geplant, derart zu validieren, dass vorab simulierte Seegänge im Kanal nachgefahren werden, sondern dass statt dessen im Versuch gefahrene Seegänge im nachhinein nachsimuliert werden.

Dadurch lag der Schwerpunkt in Projektteil 3 der *TUB* nicht wie ursprünglich gedacht auf der ‚*PreSimulation*‘, d.h. der detailgetreuen Generierung von vorab simulierten Seegängen, sondern auf der ‚*ReSimulation*‘, d.h. der exakten Aufbereitung der Versuchsseegänge für die Simulationen des Projektpartners *FSG*. Die wichtigste Voraussetzung für eine erfolgreiche Validierung der Simulation war somit die exakte Transformation der im Seegang generierten/gemessenen Seegänge an den Ort des fahrenden bzw. quertreibenden Schiffs.

Für die Transformation des Seegangs auf den Ort des fahrenden Schiffs standen verschiedene Methoden zur Verfügung. Zum einen ein Softwarepaket mit dem die Transformation von Seegängen basierend auf linearer Theorie berechnet wird. Dieses Tool wird von der

TUB seit Jahren eingesetzt und wurde durch vielfache Versuche erfolgreich validiert. Zum anderen wurde ein FEM-basiertes potentialtheoretisches Tool zur Berechnung nichtlinearer Wellenausbreitung verwendet. Dieses Programm mit dem Namen *WaveTUB* wurde ebenfalls an er *TUB* entwickelt und durch zahlreiche Messungen validiert. Beiden verfahren wurden im Rahmen von Vorversuchen im Seegangsbecken der *HSVA* getestet und validiert.

5.1.1.2. Analyse und Validierung der Transformationsmethoden durch Vorversuche an der *HSVA*

Während der Vorversuche wurden die zur Verfügung stehenden Transformationsroutinen für Seegänge auf ihre Genauigkeit untersucht. Zu diesem Zweck wurden auf Basis von Simulationsdaten maßgeschneiderte Seegänge erzeugt und aufgemessen. Diese Seegänge wurden an zwei Positionen im Kanal Messungen aufgemessen – Pegel 1 befand sich bei $x = 3,71$ m und Pegel 2 bei $x = 130,22$ m ($x = 0,00$ m entspricht er Position des Wellenerzeugers). Die berechnete (transformierte) Registrierungen wurden mit der an der jeweiligen Positionen gemessenen verglichen. Exemplarisch sind die Ergebnisse für einen der Seegänge dargestellt. Die zu diesem Seegang gehörende Registrierung am Ort des Wellenblatts ($x = 0,00$ m) sowie die dazugehörigen Klappenwinkel des Wellenerzeugers sind in Abb. 3 dargestellt.

Folgende Vergleiche wurden durchgeführt:

1. Validierung der Seegangstransformation mittels linearer Theorie:

Zur Validierung der linearen Transformation wurde der am ersten Pegel gemessene Seegang (Entfernung zum Wellenblatt $x = 3,71$ m) linear auf den Ort des zweiten Pegels ($x = 130,22$ m) transformiert (Verschiebung 126,51 m) und mit dem dort aufgemessenen Seegang verglichen. Die Ergebnisse sind für den Zeitraum $t = 400-500$ s in Abb. 4 dargestellt. Der mit linearen Methoden transformierte Seegang weist Unterschiede auf, die insbesondere aus der nicht berücksichtigten Wellen-Welle-Interaktion resultieren die sich umso stärker ausprägen je weiter die Verschiebung ist.

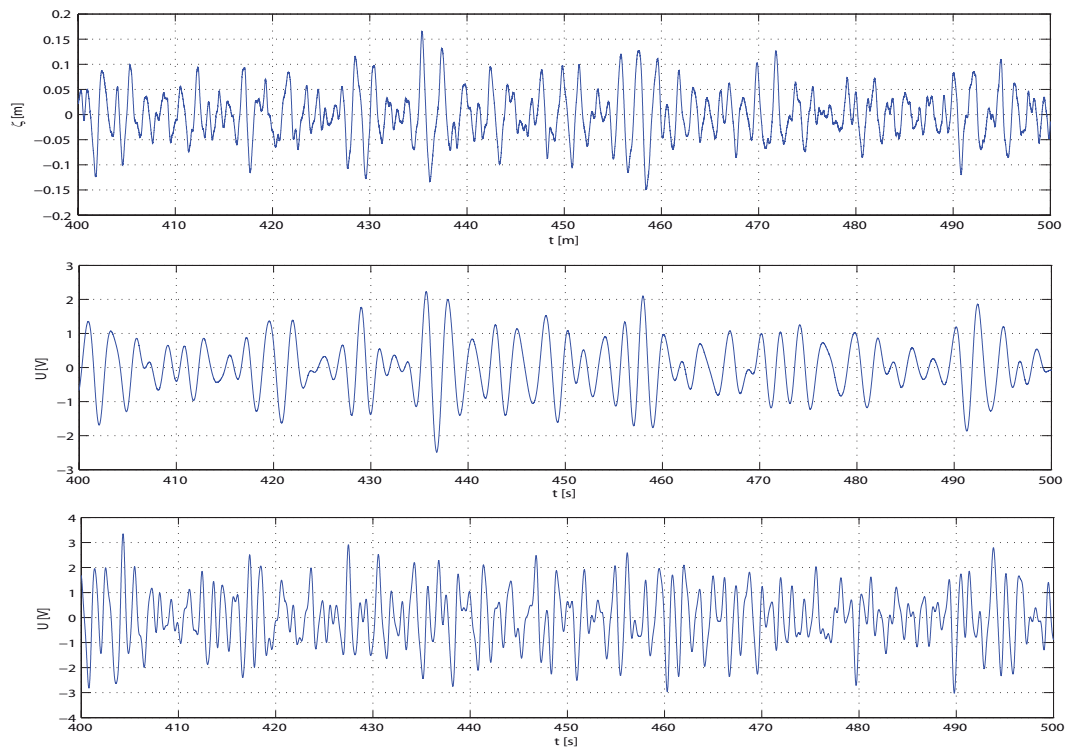


Abb. 3: Wellenzug am Ort des Wellenblatts $x = 0.00$ m (oben) sowie die dazugehörigen Steuersignale der Gesamtklappe (Mitte) und der Oberklappe (unten)

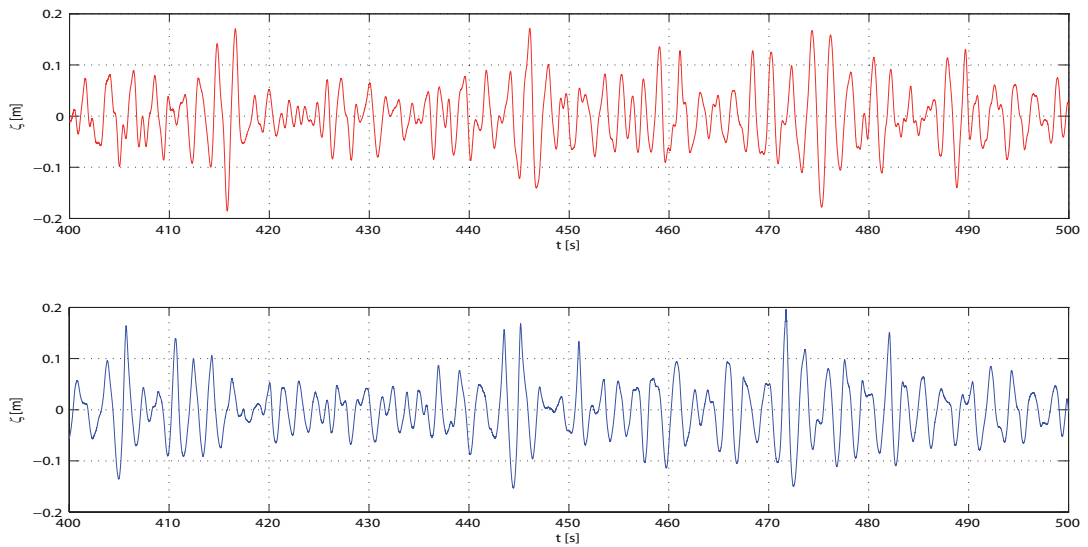


Abb. 4: Vergleich des mittels linearer Theorie vom Ort des ersten Pegels ($x = 3.71$ m) zum Zielpunkt ($x = 130.22$ m) transformierten Wellenzugs (rot) mit der im Kanal gemessenen Registrierung (blau)

2. Validierung der Seegangstransformation mittels nichtlinearer Potentialtheorie (WaveTUB)

Für diese Validierung wurde der mit *WaveTUB* berechnete Seegang mit dem tatsächlich bei Pegel 2 ($x = 130,22$ m) gemessenen Registrierung verglichen. Als Input für die potentialtheoretische Berechnung mit *WaveTUB* dienen die während des Versuchs gemessenen Klappenwinkel des Wellenerzeugers, bzw. die generierten Steuersignale. Die Ergebnisse des Vergleichs sind Abb. 5 dargestellt. Durch die Berücksichtigung nichtlinearer Effekte ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung.

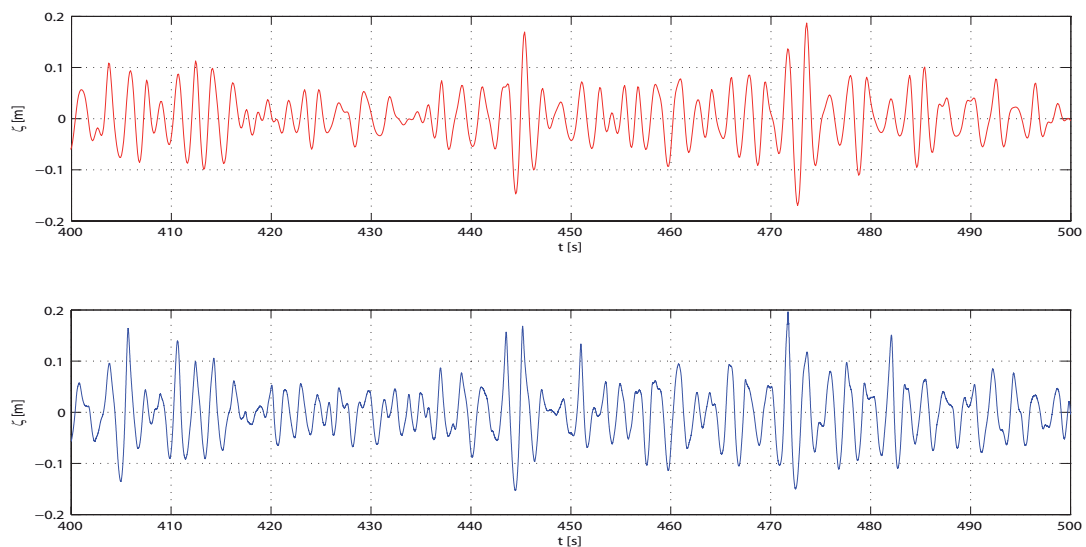


Abb. 5: Vergleich des mittels ‚WaveTUB‘ vom Wellenblatt zum Zielpunkt ($x = 130,22$ m) transformierten Wellenzugs (rot) mit der im Kanal gemessenen Registrierung (blau)

5.1.1.3. Schlussfolgerung

Die Berechnungen mit *WaveTUB* liefert deutlich bessere Ergebnisse für die Transformation des Seegangs im Ortsbereich, wenn die Entfernung zwischen Pegel/Wellenblatt und gesuchter Position im Kanal (z.B. der des fahrenden Schiffs) sehr groß ist. Aus diesem Grund wurde die potentialtheoretische Methode zur Berechnung der Wellenausbreitung, bzw. zur Berechnung der Begegnungswellenfelder am Ort des Schiffs verwendet, wenn auf Grund des Versuchsaufbaus keine Pegelmessungen in Nähe des fahrenden Schiffs gemacht werden konnten.

Für alle anderen Versuche, in denen Pegelmessungen in geringer Entfernung des Schiffs zur Verfügung standen, kann die lineare Theorie zur Anwendung kommen. Die Vorteile der linearen Theorie sind dabei zum einen ihre Robustheit und zum anderen die im Vergleich zur FEM-Methode sehr schnelle Berechnung.

Beide Methoden, *WaveTUB* und ‚*ReSimulation*‘, sowie die Methoden zur Berechnung von Seegängen aus Simulationsdaten, ‚*PreSimulation*‘, werden in den folgenden Abschnitten ausführlich dargestellt.

5.1.2. Beschreibung des implementierten Verfahrens zur „*PreSimulation*“

Im Rahmen des Vorgängerprojekts *SinSee* wurde eine Softwarepaket entwickelt, mit dem Simulationsdaten in Versuchsseegänge transformiert werden können und umgekehrt. Aufgrund einer weitreichenden Anpassung des Formats für den Datenaustausch zwischen den drei Projektpartnern *TUB*, *FSG* und *HSVA* sowie der kompletten Umstellung des Messsystems der *HSVA* zu Beginn der Projekts und der Einbeziehung weiterer Messkanäle (Druckmessungen an der Schiffsaußenhaut) musste dieses Softwarepaket angepasst und in weiten Teilen vollständig neu implementiert werden. Im folgenden wird der Programmteil zur ‚*PreSimulation*‘ ausführlich beschrieben.

Der zu generierende Seegang aus der Simulation wird von der *FSG* als JONSWAP-Spektrum (seetank.dat, z.B. seetank_LaSSe_DFDS_4.dat) zur Verfügung gestellt. In der Spalte 1 der Datei findet sich der Schiffskurs (Heading), in den Spalten 2, 3 und 4 befinden sich jeweils die Werte für Wellenkreisfrequenz, Betrag und Phasenwinkel. Die Periode im Header ist als T_j (Periode des Spektrumschwerpunktes) gegeben. Zuerst wird die Datei durch Löschen des Headers (sodass nur noch Zahlenwerte in der Datei stehen) und Abspeichern unter neuem Namen (z.B. seetank_TUB.dat) für das Einlesen vorbereitet. Anschließend erfolgt eine Analyse des Seegangs und Kontrolle der Eingabeparameter mit ‚*presim_data_analyzer*‘ (siehe Abb. 6) und die Bearbeitung mit ‚*presim_target_wave*‘ (Abb. 7). Weiterhin wird der Begegnungszeitpunkt von Schiff und Welle ermittelt der für die Versuchsdurchführung von entscheidender Bedeutung ist.

- Datenanalyse des Seegangs mit ‚*presim_data_analyzer*‘:

Zur Datenanalyse und Kontrolle der Eingabeparameter bzw. der Übereinstimmung von *FSG*- und *TUB*-Rechenverfahren wird die berechnete Welle am Schiff mit der Welle aus der *FSG*-Simulation, welche ebenfalls als Datei vorliegt, verglichen. Die jeweilige Position des Schiffes wird der beiliegenden *FSG*-Datei ebenfalls entnommen. Bevor Einleseroutine und Berechnung gestartet werden, müssen zusätzlich folgende Werte (Großausführung) eingegeben werden:

- v [kn]: mittlere Schiffsgeschwindigkeit, abzulesen aus dem Header
- μ : Kurs, ebenfalls aus dem Header von seetank.dat
- d : Wassertiefe Wellenkanal (*HSVA*: 5,60 m) \times Maßstabsfaktor λ
- t_0 und t_{max} : Sollten von der *FSG* übergeben werden, damit die Fourierreihe vollständig abgebildet werden kann.

$$t_{\max} = \frac{2\pi}{\Delta\omega} \quad (1)$$

mit $\Delta\omega$: kleinste Kreisfrequenz der Fourierreihe.

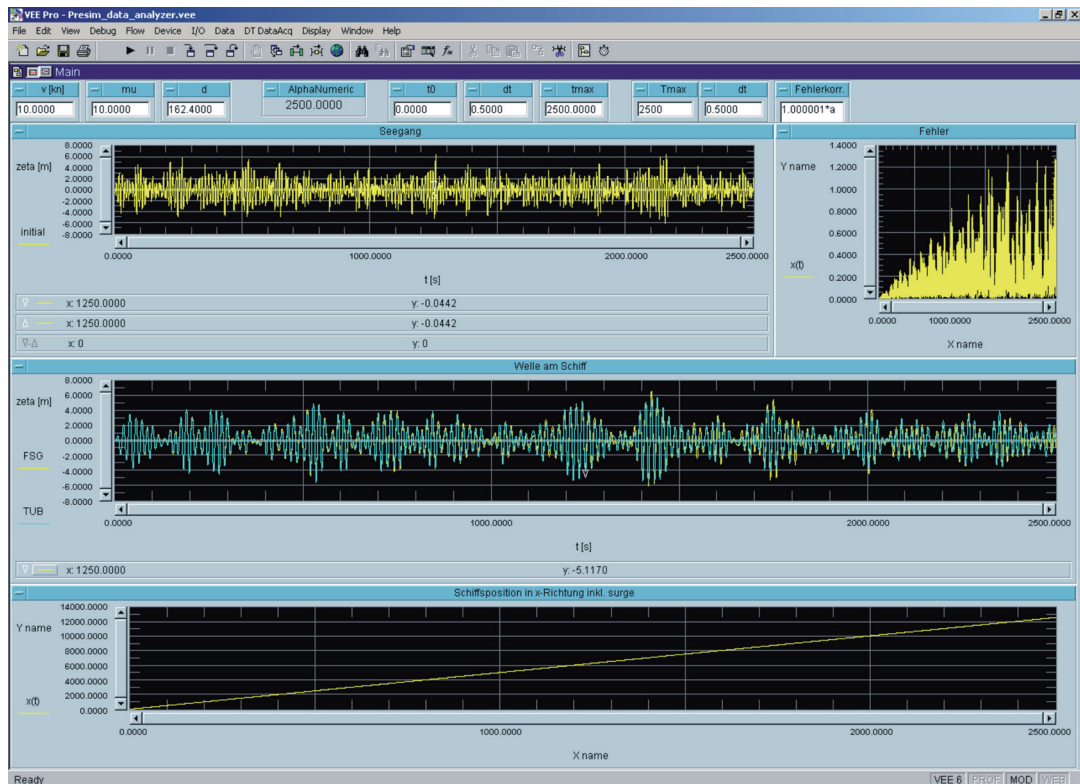


Abb. 6: ‚Presim_data_analyzer‘

Beim Starten der Berechnung werden die Eingabedateien abgefragt. Weiterhin muss ein Speicherort für die berechnete Ausgangswelle und die Welle am Schiff angegeben werden. Die Berechnung des Seegangs erfolgt durch die Gleichung

$$\zeta(t_i) = \sum_j (A_j \cos \omega_j t_j + C_j) \quad (2)$$

wobei die Werte ω_j , A_j und C_j aus seetank.dat eingelesen werden (Clauss et al.(2005)).

Die Welle am Schiff ergibt sich aus

$$\zeta(t_i) = \sum_j (A_j \cos \omega_j t_j + C_j - k_j \Delta x) \quad (3)$$

wobei Δx aus `xtank.dat` eingelesen wird. Die Wellen aus Simulation und Berechnung sollten bei korrekter Eingabe übereinstimmen. Mit größer werdendem t nimmt die Abweichung zu. Dieser numerische Fehler wird in einem Fenster ausgegeben.

- Bearbeitung mit `presim_target_wave`:

Der Zielwellenzug wird wie im `presim_data_analyzer` aus `seetank_TUB.dat` eingelesen, auf Modellmaßstab skaliert, neu gerastert (200 Hz für Steuersignal), bei achterlichem Seegang zeitverschoben, ggf. in der Höhe skaliert (*enlarge*), mit einem Fade-in und Fade-out versehen und im Single-Channel-Format ausgegeben. Abb. 7 zeigt einen Screenshot des Programms `presim_target_wave`.

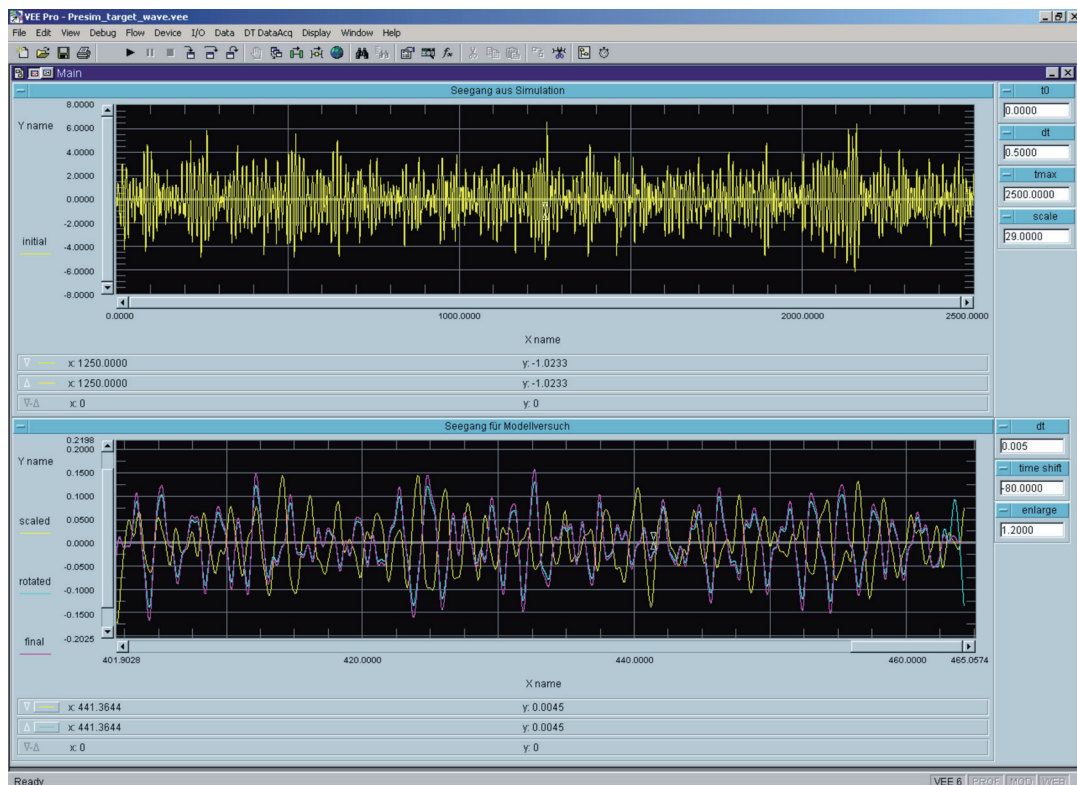


Abb. 7: `presim_target_wave`

- Skalieren: Der Seegang aus der Simulation (Großausführung) wird auf Modellmaßstab skaliert. Hierfür wird unter *scale* der Maßstabsfaktor λ eingegeben. Weiterhin müssen t_0 und t_{max} eingegeben werden.

- Neu rastern: Da die Zeitschrittweite aus der Simulation im allgemeinen nicht der Rasterung für das Steuersignal (200 Hz, $\Delta\omega = 0,005$ s) entspricht, wird der Seegang neu gerastert.

- Zeitverschiebung: Bei achterlichen Seegängen muss das Schiffsmodell warten, bis sich die Wellen im Kanal ausgebreitet haben, um nicht "vor den Wellen herzufahren", bzw. diese nicht zu überholen. Die Wartezeit t_w ergibt sich aus der Phasengeschwindigkeit der Welle und der Fahrtgeschwindigkeit des Schiffs. Damit das Schiff die Wellen genauso erfährt wie in der Simulation, muss der Wellenzug um diese Zeitspanne (der genaue Wert wird später mit 'Cutoff' bestätigt) "rotiert" werden. Der "Rotationswert" ergibt sich aus dem Quotient von Zeitschrittweite $\Delta\omega$ (0,005 s) und der Anzahl der Werte n

$$n = \frac{t_w}{\Delta t} \quad (4)$$

- Vergrößern (optional): Unter *enlarge* können die Amplituden des Seegangs um den eingegebenen Faktor skaliert werden.

- Durch das Rotieren kann eine Sprungstelle entstehen, da die technisch erforderliche Zeitschrittweite im Modellmaßstab (200 Hz) nicht mit der theoretisch richtigen Skalierung

$$\Delta t_{theo} = \frac{t_{fullscale}}{\sqrt{\lambda}} \quad (5)$$

übereinstimmt. Diese Stelle muss später bei der Wellengenerierung durch die obere Filterfrequenz ω_{end} geglättet werden.

- Signal fade-in / fade-out: 'presim_target_wave' legt am Anfang und Ende eine "Rampe" über den Seegang, das Ergebnis wird mit der Bezeichnung *final* im unteren Fenster zusammen mit dem skalierten und dem rotierten Seegang angezeigt.

Der als TUB_target.000 abgespeicherte Seegang kann nun mit 'WaveGen' in die Steuersignale für die Wellenmaschine umgewandelt werden (Claus, G. und Hennig, J. (2003)).

- Ermittlung des Begegnungszeitpunktes t_e mit *Cutoff*:

Die *HSV A* benötigt den Zeitpunkt, bei dem sich der Anfang des Wellenzugs aus der Simulation an der Begegnungsposition x_{target} (Position im Wellenkanal, bei der das Modell auf Kurs und Fahrt ist - von der *HSV A* angegeben) befindet, um die Versuchsfahrt zum richtigen Zeitpunkt zu starten (Claus et al. (2005)). Da die Zeitreihe in 'WaveGen' zeitverschoben wurde, befindet sich dieser nicht mehr bei t_0 . Die Ermittlung von t_e erfolgt nach der Umwandlung mit 'WaveGen' folgendermaßen:

- Einlesen der Zeitreihe am Ort der Wellenmaschine (wird von ‚WaveGen‘ abgespeichert)
- **MoveX** nach xtarget
- Visuelle Lokalisierung durch Vergleichen mit dem Zielwellenzug und ablesen von t_e

5.1.3. Beschreibung des implementierten Verfahrens zur ‚ReSimulation‘

Zur Realisierung simulierter Versuche der *FSG* werden deterministische Wellensequenzen für den Schlepptank der *HSVA* wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben generiert. Mit diesen und anderen Seegängen werden Versuche durchgeführt, in denen sich das Schiff ähnlich verhält wie in der Simulation. Um die numerischen Methoden durch direkten Vergleich zu validieren, muss das Schiff den Wellenzug genau so treffen wie in der Simulation. Da dies meist nicht exakt erreicht werden kann, wird eine „Re-Simulation“ mit genau den Bedingungen aus den Versuchsfahrten durchgeführt (Claus et al. (2005)).

Hierfür wird das am Wellenerzeuger gemessene Signal gefiltert, auf die Schiffsposition umgerechnet, zeitverschoben, auf Großausführung skaliert und mit ca. 50 bis 100 Fourierkoeffizienten als Spektrum im *FSG*-Format ausgegeben. Die Pegelmessung der Welle am Wellenerzeuger liegt in einer Datei im Single-Channel-Format (z.B. TUB_Welle.005) vor. Alle weiteren benötigten Daten befinden sich in einer Messdatei der *HSVA* (z.B. expo0401.dat). In der *HSVA*-Datei befinden sich in den Spalten 0, 1, 4, 6 und 9 jeweils die Werte für Zeit, X-Position des Kielpunktes, Rollwinkel und Kurs (alles im Modellmaßstab).

- Bearbeitung der gemessenen Welle mit ‚Cutoff‘ (siehe Abb. 8):
 - Einzulesende Datei: TUB_Welle.005
 - Erstellt Datei: TUB_Wellec.005

Nach dem Einlesen der Pegelmessung am Wellenerzeuger (TUB_Welle.005) empfiehlt es sich, zuerst auf [Grafik total] zu klicken, um den gesamten Zeitschrieb ansehen zu können. Anschließend wird ein [Trend Removal] durchgeführt und das Signal nach Ermessen gefiltert (untere Grenze im Bereich 0,5-1,0 rad/s, obere Grenze im Bereich 8-14 rad/s). Sollte bei der Messung mehr aufgezeichnet worden sein als der eigentliche Wellenzug, ist dieser Bereich zu schneiden. Der bearbeitete Zeitschrieb wird z.B. als TUB_Wellec.005 gespeichert.

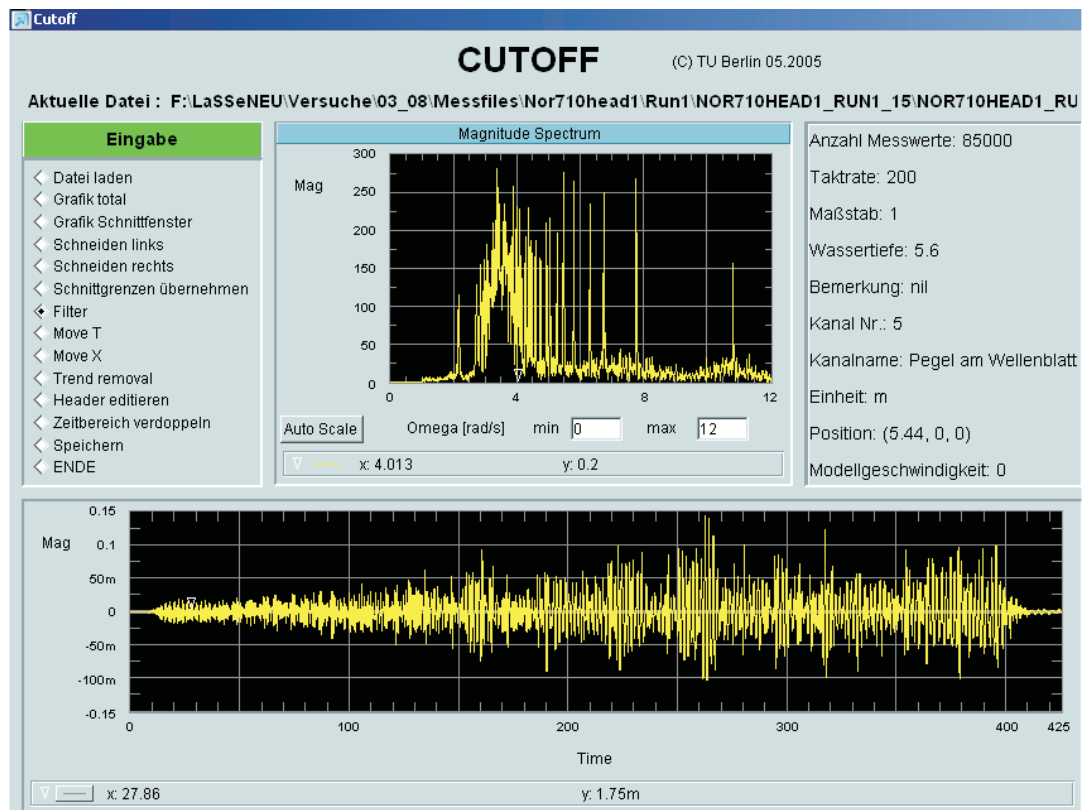


Abb. 8: ‚Cutoff‘

- Analyse der Schiffsbewegung in x-Richtung mit ‚ReadXPos‘ (siehe Abb. 9):

– einzulesende Datei: HSVA_name.dat

Die *FSG* gibt den für die Simulation interessanten Bereich an. Zur Auswahl des zu simulierenden Bereichs werden im oberen Fenster Center-Marker gesetzt. Der geschnittene Bereich wird nach Klick auf [OK] im unteren Fenster angezeigt und die Schnittgrenzen X_{Anfang} und X_{Ende} werden rechts als n-ter Messwert ausgegeben. Diese Werte sind zu dokumentieren und bei den nachfolgenden Schritten als Eingabewerte zu verwenden.

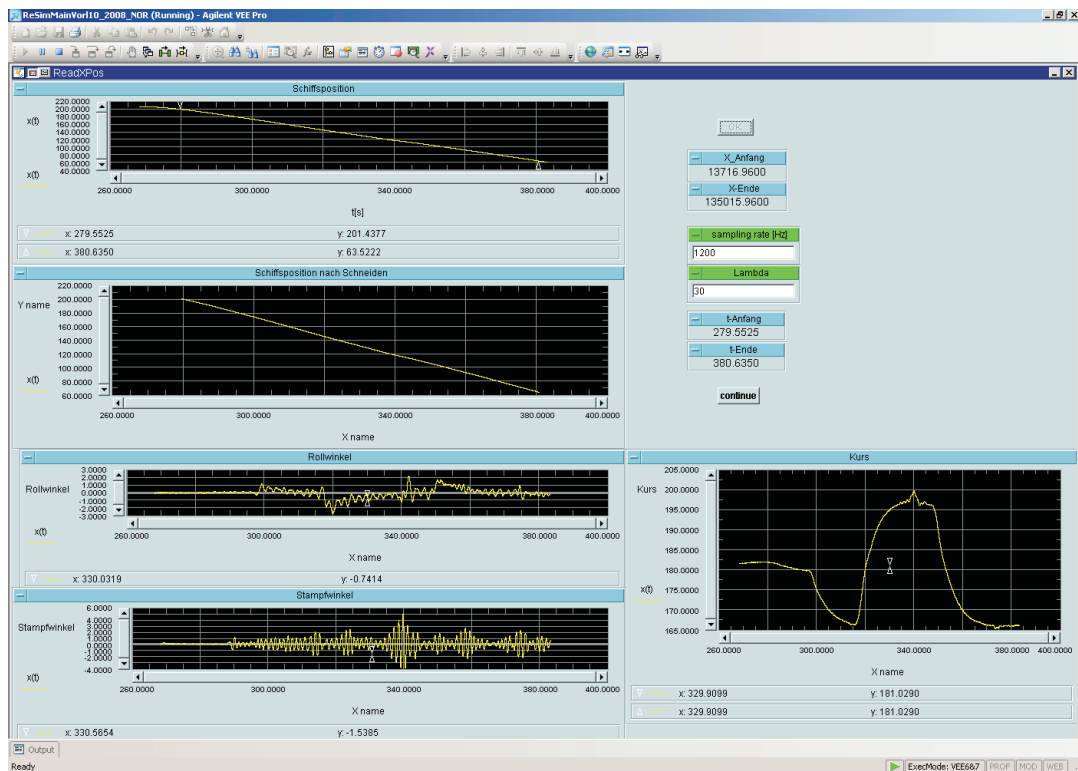


Abb. 9: ‚ReadXPos‘

- Transformation mit ‚rolls-resimulation‘ (siehe Abb. 10):

Die am Wellenerzeuger gemessene, bearbeitete Zeitreihe für den Seegang wird eingelesen, auf die Startposition des Schiffs umgerechnet, zeitverschoben und skaliert. Die X-Position wird eingelesen, orts- und zeitverschoben und skaliert.

- Eingabewerte: Maßstabsfaktor, X_{Anfang} , X_{Ende}
- Einzulesende Dateien: TUB_Wellec.005, HSVA_name.dat
- Erstellt Datei: wave.dat, x-pos.dat
- Abzulesen: Zeitschrittweite (dt) und Kurs (course)

Nach Eingabe des Maßstabsfaktors und der Schnittgrenzen wird die Berechnung mit [Run] gestartet. Es werden nacheinander der Speicherort von TUB_Wellec.005, HSVA_name.dat sowie für die berechnete Welle (wave.dat) [! programminterner Dateiname] und die entsprechende X-Position des Schiffs (x-pos.dat) [! programminterner Dateiname] abgefragt. Das Programm liest automatisch die Position des Pegels, den Kurswinkel sowie Startzeitpunkt t_e und Startposition x_e aus HSVA_name.dat ein. Im oberen Fenster erscheinen der am Wellenerzeuger gemessene, der auf die Startposition des Schiffs umgerechnete und der nach $t = 0$ zeitverschobene Wellenzug. Letzterer

wird automatisch auf Großausführung skaliert, im mittleren Fenster ausgegeben und als wave.dat gespeichert. Die X-Position wird nach $x = 0$ und $t = 0$ verschoben (linkes unteres Fenster), skaliert (rechtes unteres Fenster) und als x-pos.dat abgespeichert. Der Kurswinkel und die Zeitschrittweite dt sind für die weitere Bearbeitung zu dokumentieren.

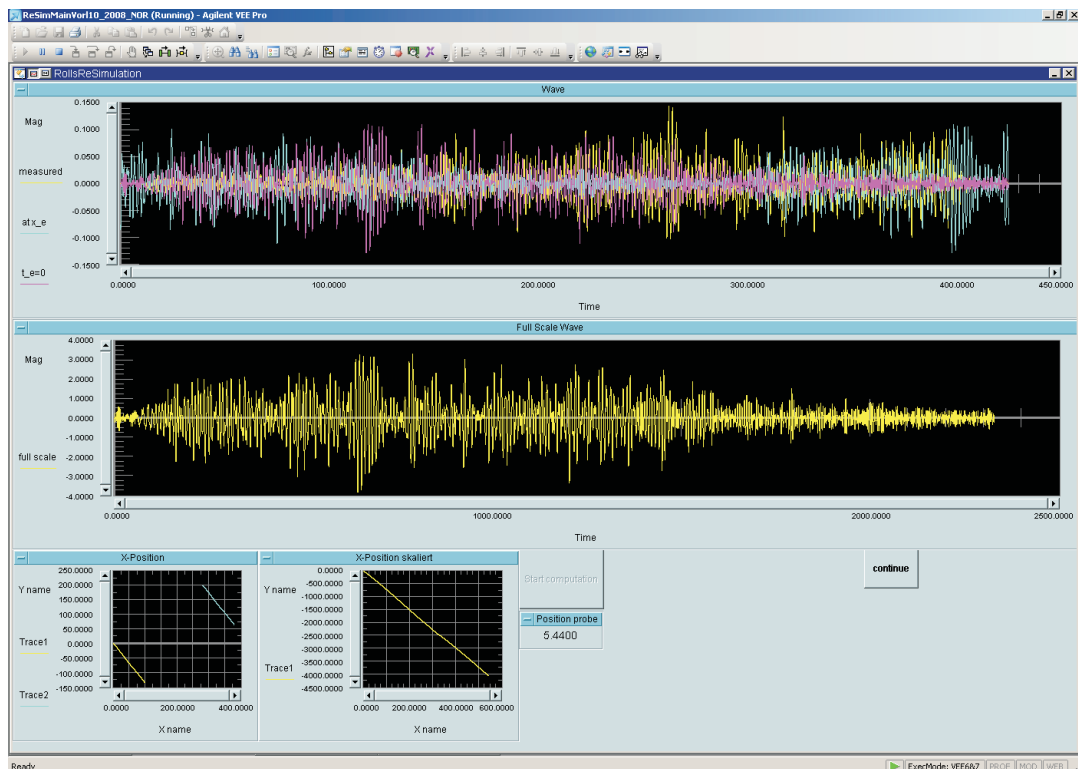


Abb. 10: ‚rolls-resimulation‘

- Schreiben des Spektrums mit ‚new_spectral_values‘ (siehe Abb. 11):

Der mit ‚rolls-resimulation‘ berechnete Wellenzug wave.dat wird eingelesen und als Fourierspektrum im FSG-Format mit einer begrenzten Anzahl Spektralkomponenten (um den Rechenaufwand in der FSG-Simulation zu reduzieren) ausgegeben.

- Eingabewerte: Kurswinkel μ (abgelesen in ‚rolls-resimulation‘)

f_{min}, f_{max} : kleinste und größte Frequenz für das Fourierspektrum

T_{max} : obere Grenze des Simulationsbereichs

n_{new} : neue Anzahl der Zeitschritte

- Einzulesende Dateien: wave.dat [! programminterner Dateiname]
- Erstellt Dateien: seetank.dat und xtank.dat,

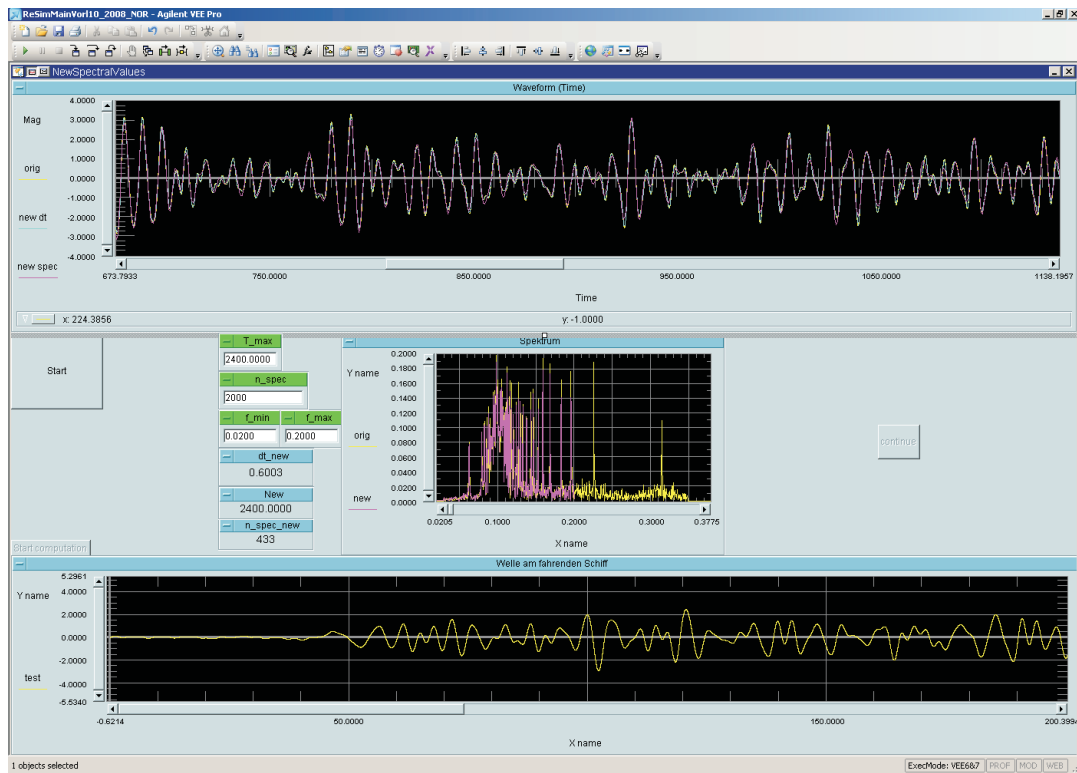


Abb. 11: ‚new_spectral_values‘

Die in ‚rolls-resimulation‘ abgelesene Zeitschrittweite dt und der Kurswinkel μ sind einzugeben. Bei der Eingabe von f_{min} und f_{max} ist darauf zu achten, dass alle Peaks des Spektrums innerhalb dieser Grenzen liegen. Die Datenreduktion ergibt sich sowohl durch Filtern (f_{min} , f_{max}) als auch durch eine gröbere Rasterung der Zeitreihe. (Die Spektralform erlaubt hier keine Neurasterung des Spektrums ohne übermäßigen Datenverlust.)

T_{max} ergibt sich aus

$$T_{max} = \frac{1}{f_{min}} \tag{6}$$

wobei es sich bei f_{min} um die tatsächlich kleinste Frequenz handelt. Es hat sich gezeigt, dass sich für die Simulation der Zeitreihen aus den Versuchen meist Werte für T_{max} im Bereich von ca. 350 bis 600 Sekunden ergeben. Ferner ist darauf zu achten, ein T_{max} zu wählen, bei dem die Welle in etwa die gleiche Amplitude und Steigung hat wie bei

$t = 0$. Andernfalls kann die Welle nicht exakt wiedergegeben werden, da die längste Welle nicht ganzzahlig ins Zeitfenster passt.

Die neue Zeitschrittweite dt_{new} wird hieraus automatisch berechnet zu

$$dt_{new} = \frac{T_{max}}{n_{new}} \quad (7)$$

wobei

$$n_{new} \geq 2 \cdot f_{max} \cdot T_{max} \quad (8)$$

zur Befriedigung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems sein muss.

Nach Starten der Berechnung mit [Run] werden der Speicherort von wave.dat und der für die zu erstellenden Spektrum-Datei spektrum.dat abgefragt. Im oberen Fenster erscheinen der eingelesene, der mit dem alten Spektrum neu gerasterte und der durch das neue Spektrum wiedergegebene Wellenzug (letzterer im Bereich von 0 bis T_{max}). Unten erscheinen das alte und neue Spektrum, welches automatisch als spektrum.dat abgespeichert wird. Der angezeigte Wellenzug mit neuer Rasterung und altem Spektrum dient der Kontrolle der Zeitschrittweite und sollte völlig mit dem Original übereinstimmen. Es ist nun durch Vergleichen der angezeigten Wellen zu überprüfen, ob der Wellenzug mit den gewählten Parametern (T_{max} , n_{new} , f_{min} , f_{max}) ausreichend genau abgebildet werden kann. Anderenfalls werden diese solange verändert und die Berechnung wiederholt, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht wird.

Die Parameter n_{new} und T_{max} beeinflussen maßgeblich die Anzahl der neuen Spektralkomponenten. Bei langen Wellenzügen kann die gewünschte Höchstzahl von maximal 100 Komponenten unter Umständen nicht ohne starken Verlust an Genauigkeit eingehalten werden. Es ist iterativ ein Kompromiss zu finden, um eine möglichst große Genauigkeit bei möglichst geringer Komponentenanzahl zu erreichen.

In der ersten spalte von seetank.dat wird die Wellenanlauffrichtungen abgespeichert. In den restlichen Zeilen stehen die Spektralkomponenten, wobei in den Spalten 2, 3, 4, 5 jeweils Kurswinkel, Kreisfrequenz ω , Betrag und Phasenwinkel stehen. In xtankTUB.dat werden die skalierten Messwerte an die FSG übergeben.

5.1.4. ‚WaveTUB‘

Der ‚WaveTUB‘ ist ein am Fachgebiet Meerestechnik der TUB entwickelter numerischer Wellenkanal der nach der Simulation charakteristische Daten über das Wellenverhalten ausgeben kann. ‚WaveTUB‘ dient der Simulation von nichtlinearen Wellenausbreitungen im numerischen Wellenkanal, dem die gemischte Euler-Lagrange-Formulierung des Anfangs-

Randwertproblems zugrunde liegt. Zur Lösung der Laplace-Gleichung für Neumann- und Dirichlet-Randbedingungen wird die Methode der finiten Elemente eingesetzt. Die Integration in der Zeit erfolgt mit der klassischen Runge-Kutta-Methode vierter Ordnung. Störende Reflexionen am Kanalende werden durch ein effizientes numerisches Absorptionsverfahren vermieden. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens findet sich bei Steinhagen, U. (2001) sowie bei Claus, G. F. und Pákozdi, C. (2002a).

Der FEM-basierte ‚WaveTUB‘ kann Piston-Type Wellenblattbewegungen (nur translatorische Bewegungen), Flap-Type Wellenblattbewegungen (rotatorische Bewegungen), bzw. Double-Flap-Type oder eine beliebige Kombination der drei Bewegungsarten simulieren. Abb. 12 zeigt ein Beispiel für ein Double-Flap-Type Wellenblatt mit zusätzlicher translatorischer Bewegung.

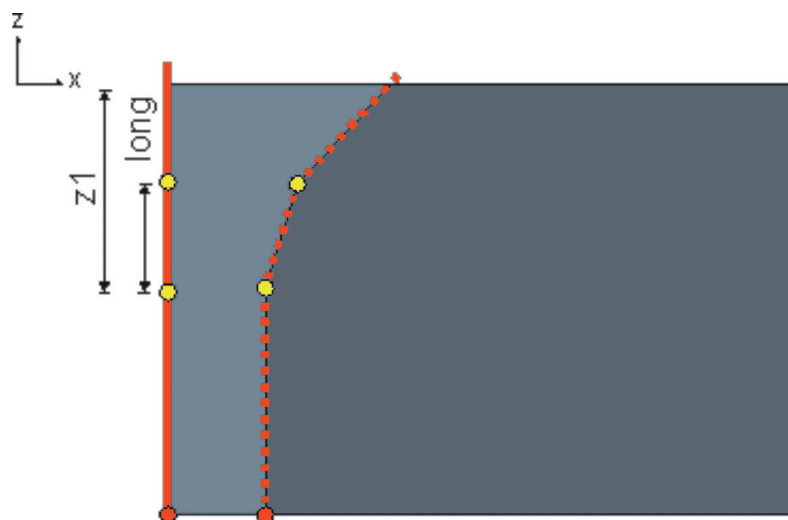


Abb. 12: simuliertes Wellenblatt

Als Datengrundlage für die Simulation mit ‚WaveTUB‘ dienen entweder das drv-file (Steuerfile) eines Versuchs oder die gemessenen Wellenblattbewegungen. Diese sind in das entsprechende 3-spaltige ‚WaveTUB‘-Input-Format zu transferieren (Spalte 1: translatorische Bewegung, Spalte 2: rotatorische Bewegung der Gesamtklappe, Spalte 3: rotatorische Bewegung der Oberklappe). Ein Parameter-File steuert alle für die Simulation notwendigen Randbedingungen, wie z.B. Simulationsdauer, Zeitschrittweite, Anzahl der Gitterzellen, Anzahl der zu registrierenden Pegel sowie das Speicherintervall.

Da der ‚WaveTUB‘ stets den gesamten Kanal simuliert, lassen sich beliebig viele verschieden positionierte Pegel berechnen. Auch die Berechnung fahrender Pegel (z.B. am Ort des sich bewegenden Schiffs) sind möglich. Dazu kann die Schiffsposition in Abhängigkeit der Zeit entweder zu Beginn der Rechnung als Parameter angegeben werden oder man berechnet sie später aus der Ausgabedatei surface.dat, welche die Oberflächenauslenkung des gesamten Kanals für jeden Zeitschritt der Simulation beinhaltet.

Abb. 13 bis Abb. 15 zeigen Ergebnisse einer Simulation eines Wellenpakets.

Aufgrund der Berücksichtigung nichtlinearer Effekte ist die Berechnung der Wellenausbreitung mit „WaveTUB“ sehr präzise und wurde somit in einer Reihe von Fällen zur Berechnung der Welle am Schiff, so wie sie sich im Versuch darstellte, genutzt.

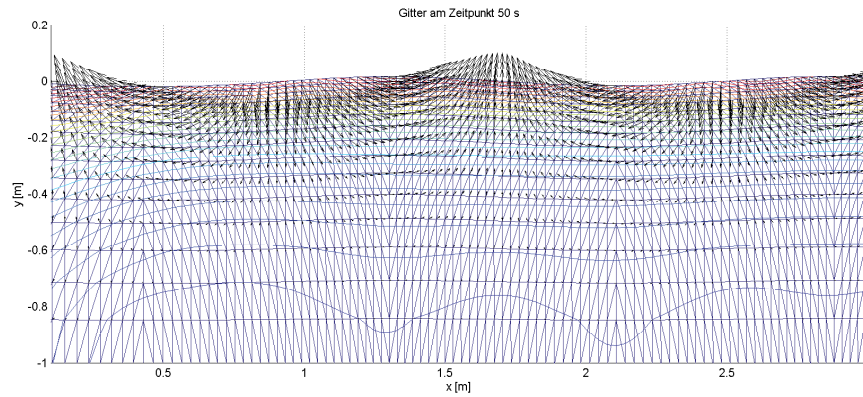


Abb. 13: FEM-Gitter mit Potentiallinien und Geschwindigkeitsvektoren

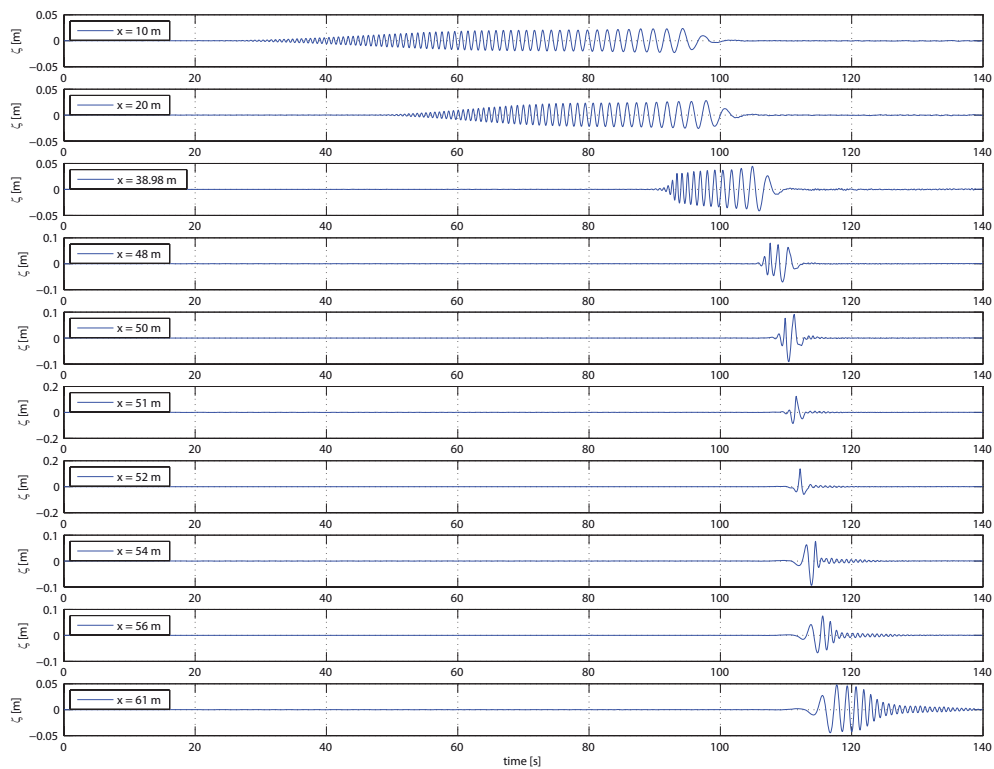


Abb. 14: Pegelregistrierungen an 10 verschiedenen Positionen im simulierten Kanal

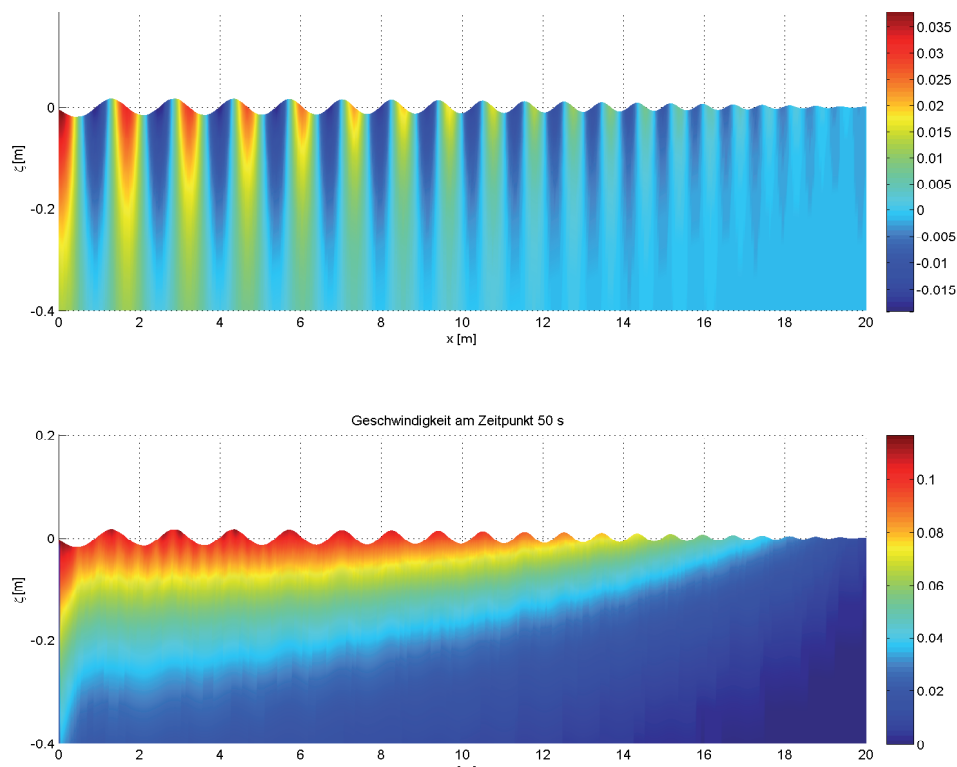


Abb. 15: Potential (oben) und Geschwindigkeitsverteilung (unten)

5.1.5. Liste der Versuche

Insgesamt 4 Versuchsreihen mit Seegang wurden an der *HSVA* durchgeführt. Zu jeder Versuchsreihe wurden Seegänge in Absprache mit dem Projektpartner *FSG*, basierend auf dessen Simulationen, vorbereitet. Über den Großteil der Seegänge die im Rahmen des Projekts generiert wurden, wurde in enger Abstimmung mit den Projektpartnern vor Ort, während der Versuche in der *HSVA*, entschieden.

Die ausführliche Auflistung aller Versuche findet sich in Anhang A, auf Seite 103.

5.1.6. Veröffentlichungen

Im Rahmen dieses Projektteils sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

- national: keine
- international: keine

5.2. zu Projektteil 2: Entwicklung eines Verfahrens zur Prognose von Extremwellen aus Wellenzügen

In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner *OWS* wurden in diesem Projektteil aus Serien gemessener Radarbilder Wellenkonturen, d.h. Wasserspiegelauslenkungen im Ortsbereich, abgeleitet. Daraus lassen sich komplette kurzkämmige Seegänge im Nah- und Fernbereich eines Schiffs/einer Struktur vorausberechnen.

Die Transformationsalgorithmen wurden zunächst für langkämmige Seegänge entwickelt und mit Hilfe der Wellenkanäle der *TUB* experimentell validiert. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner *OWS* wurden sie anschließend auf die Anwendung für langkämmige, irreguläre und später auch für richtungsabhängige, kurzkämmige, irreguläre Seegänge erweitert.

Zusätzlich zur eigentlichen Aufgabenstellung ergab sich im Rahmen dieses Teilprojekts die Möglichkeit die entwickelte Seegangsvorhersage weiterführend als Basis für die Vorhersage von Schiffsbewegungen/Strukturantworten zu nutzen. Dazu wurden Algorithmen entwickelt die aus Begegnungswellenzügen eines Schiffs/einer Struktur mittels Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich richtungsabhängige Antwortspektren berechnen, welche dann, zurücktransformiert in den Zeitbereich, die Vorhersage der Schiffsbewegungen in 6 Freiheitsgraden ergeben. Im Laufe dieser Projektarbeit sind eine Reihe von nationalen und internationalen Veröffentlichungen entstanden, in denen der gesamte Entwicklungsprozess sowohl zu den Verfahren zur Wellenvorhersage als auch zu den Verfahren zur Bewegungsvorhersage detailliert ausgeführt sind (siehe Testa, D. (2006), Claus et al. (2007), Claus et al. (2008), Claus et al. (2009a) und Claus et al. (2009b)).

Im folgenden werden die Verfahren zur Wellenvorhersage sowie zur Bewegungsvorhersage in gekürzter Form beschrieben. Die vollständige, ausführliche Beschreibung kann den oben genannten Veröffentlichungen, die diesem Bericht beiliegen, entnommen werden.

5.2.1. „2D-Wave Forecast“ – Superpositions-Methode

Der erste Schritt auf dem Weg zur Entwicklung eines Systems zur Seegangsvorhersage war die Entwicklung eines Transformationsalgorithmus für langkämmigen (2D) Seegang mit dem Momentaufnahmen der Wasseroberfläche (Snapshots) im Ortsbereich oder Zeitbereichsregistrierungen an beliebigen Orten berechnet, bzw. vorhergesagt werden können. Die dazu notwendigen Methoden entstanden im Rahmen einer Diplomarbeit (Testa, D. (2006)), welche Teil dieses Projekts war. Abb. 16 zeigt eine Übersicht der von Testa entwickelten Methodik mit der Zeitreihen der Oberflächenauslenkungen an beliebigen Orten, z.B. für eine stationär verankerte Struktur ($v = 0$ kn, $F_n = 0$) oder ein fahrendes Schiff ($v \neq 0$ kn, $F_n > 0$), berechnet werden können.

Ein Snapshot der Wellenerhebungen im umgebenden Seegang, aufgenommen mittels eines gewöhnlichen X-Band Radars und aufbereitet durch ein *WaMoS II*[®] System des Projektpartners *OWS*, dient als Datenbasis für das entwickelte Programm. Unter der vereinfachten Annahme, dass es sich bei dem aufgemessenen Seegang um langkämmige Wellenzüge handelt, kann dieser Snapshot (Abb. 16, 1b) mittels FFT (Fast Fourier Transformation) in den

Frequenzbereich transformiert werden. Das Ergebnis ist ein Seegangsspektrum (Amplituden und Phasen), aufgetragen über $1/L$ (siehe Abb. 16, 2a).

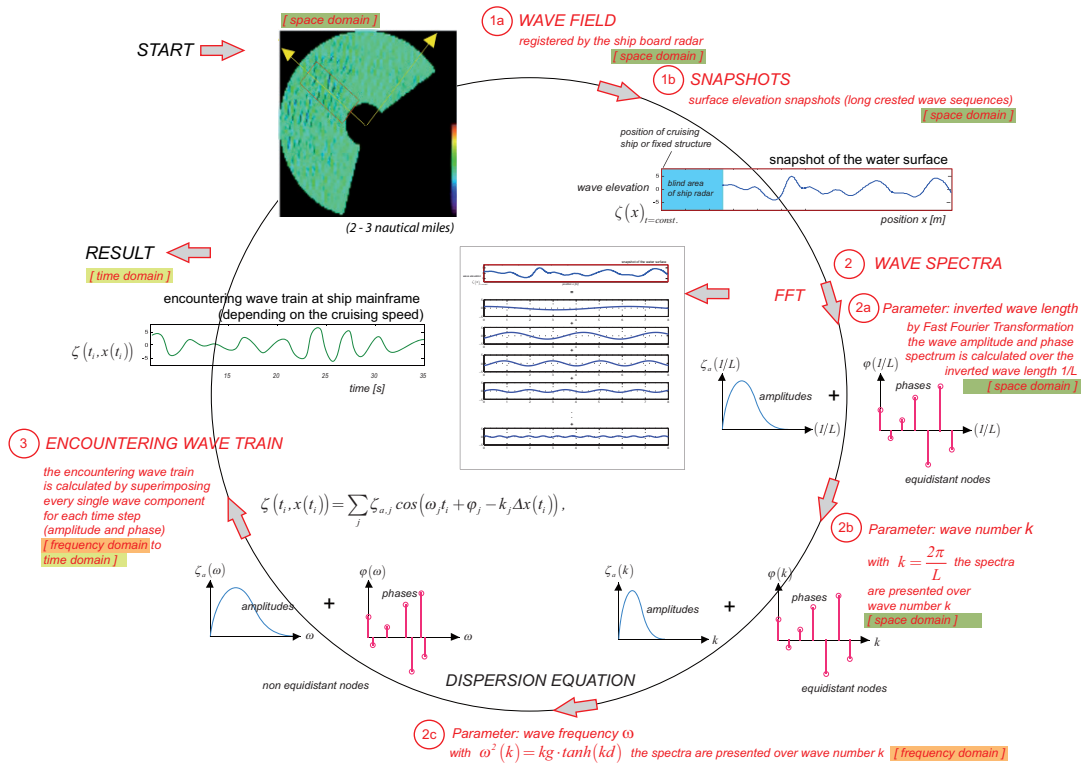


Abb. 16: '2D-Wave Forecast' – Superpositions-Methode

Durch Berechnung der korrespondierenden Wellenzahlen k und mit Hilfe der Dispersionsgleichung

$$\omega^2(k) = kg \cdot \tanh(kd) \tag{9}$$

kann man das Spektrum über der Kreisfrequenz ω auftragen. Verglichen zum Spektrum über $1/L$ hat das Spektrum über ω keine äquidistanten Stützstellen mehr. Aus diesem Grund ist im folgenden eine Rücktransformation aus dem Frequenz- in den Zeitbereich per IFFT (Inverse Fast Fourier Transformation) nicht mehr möglich. Die Rücktransformation in den Zeitbereich muss daher durch Superposition der Einzelkomponenten des Spektrums erfolgen (siehe Abb. 16 - 3).

Für den stationären Fall (fixe Position, ($v = 0$ kn, $F_n = 0$)) ergibt sich die Vorhersage der Wellenerhebung an diesem Ort zu

$$\zeta(t_i, x(t_i)) = \sum_j \zeta_{a,j} \cos(\omega_j t_i + \varphi_j - k_j \Delta x(t_i)), \quad (10)$$

wobei Δx den Abstand zwischen der fixen Position und dem Koordinatenursprung des 2-dimensionalen Snapshots angibt.

Für einen sich im Raum bewegenden Punkt (fahrendes Schiff, $v \neq 0$ kn, $F_n > 0$) ergibt sich der Begegnungswellenzug aus

$$\zeta(t_i, x(t_i)) = \sum_j \zeta_{a,j} \cos(\omega_j t_i + \varphi_j - k_j \Delta x(t_i)), \quad (11)$$

wobei $x(t_0) = x_0$ die Position des Schiffs zum Zeitpunkt t_0 der Aufnahme des Snapshots angibt und $\Delta x(t_i)$ die zeitabhängige Entfernung zwischen Schiff und dem Koordinatenursprung des 2-dimensionalen Snapshots für jeden Zeitschritt t_i .

Um das Verfahren zu validieren wurden keine Radarmessungen, wie oben beschrieben, verwendet, sondern es wurden Snapshot im Wellenkanal der TUB erzeugt. Dazu wurden aus einer Vielzahl einzelner Pegelregistrierungen (234 Stück), verteilt über gesamten Kanal, Snapshots der Wasseroberfläche erzeugt, indem aus jeder der 234 Pegelregistrierung die Wellenerhebung für einen definierten Zeitpunkt t entnommen wurde. Der Abstand der Pegel betrug dabei $\Delta x = 0,05$ m, wodurch, mit Berücksichtigung des ‚Shannon-Theorems‘, auch die kürzesten Wellen korrekt registriert werden konnten. Abb. 17 und Abb. 18 illustrieren die Vorgehensweise.

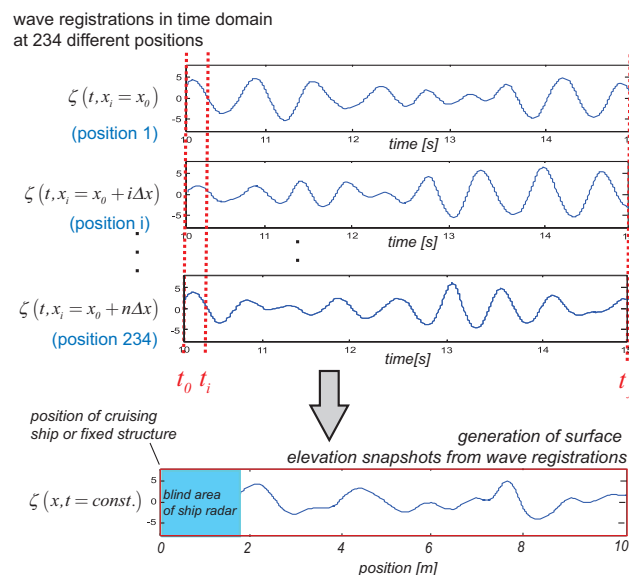


Abb. 17: Erzeugen von Snapshots aus einzelnen Pegelregistrierungen

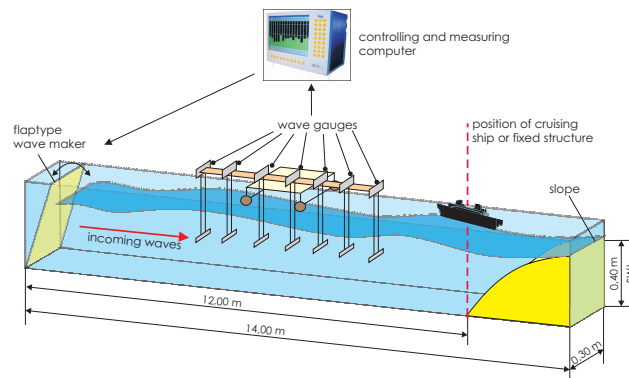


Abb. 18: Versuchsaufbau

Es wurde ein Seegang mit $\omega = 3 - 12 \text{ rad/s}$ im Maßstab 1:370 erzeugt. 10 m Messstrecke ergeben somit 3.700 m in der Großausführung.

Abb. 19 zeigt Snapshots der Wasseroberfläche des gleichen Seegangs, allerdings unter Annahme dreier verschiedener „Radarreichweiten“ sowie die sich daraus ergebenden Vorhersagen für Pegelregistrierungen am Ort $x = 0 \text{ m}$. Durch den unterschiedlichen Gehalt an Informationen in den drei Snapshots ist der Zeitbereich, für den eine exakte Vorsage möglich ist, unterschiedlich lang.

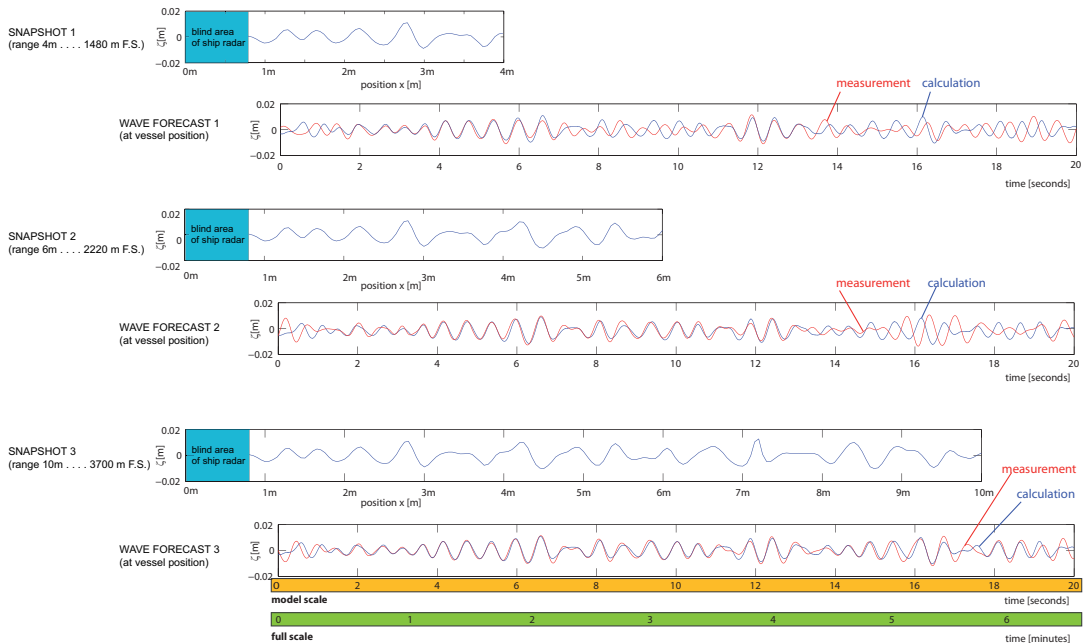


Abb. 19: Vorhersage von Begegnungswellenzügen an einer fixen Position unter Berücksichtigung dreier verschiedenen „Radarreichweiten“ (rot: Messung, blau: Berechnung)

Je größer die Reichweite, desto mehr Informationen über den Seegang stehen zur Verfügung und umso länger ist der Zeitraum für den eine exakte Wellenvorhersage möglich ist. Zur Validierung wurden den Vorausberechnungen jeweils Messungen gegenübergestellt. Für eine „Radarreichweite“ von 10 m (3.700 m in der Großausführung) ergibt sich eine exzellente Übereinstimmung der Vorhersage mit der Messung für einen Zeitraum von 14 s (2 s – 16 s), entsprechend 270 s in der Großausführung. Die Diskrepanz innerhalb der ersten 2 s ergibt sich aus der Tatsache, dass, wie beim richtigen Radar, ein Totbereich, d.h. ein Bereich in dem das Radar nichts sieht, von ca. 0,8 m angenommen wurde. D.h. die effektive Reichweite reduziert sich von 10 auf 9,2 m, wodurch am Anfang der Vorhersage Informationen fehlen. Generell zeigt der Vergleich mit Messungen eine ausgezeichnete Vorhersagequalität.

5.2.2. „3D-Wave Forecast“ – Superpositions-Methode

Aufbauend auf dieser Methodik wurden die Transformationsalgorithmen für den Einsatz mit multidirektionalen Spektren kurzkämmiger Seegänge weiterentwickelt.

Um die Ausbreitung 3-dimensionaler, d.h. kurzkämmiger, multidirektionaler Seegänge vorherzusagen zu können, muss die im multidirektionalen Spektrum vorhandene 2-dimensionale Phaseninformation (k_x, k_y), die gleichzeitig Richtungsinformation ist, berücksichtigt werden. Bei Anwendung der Superpositionsmethode ergibt sich daher nach Anpassung von Gl. (11) folgende Gleichung für die Berechnung/Vorhersage der Wellenausbreitung in einem 3-dimensionalen Raum:

$$\zeta(t_i, x(t_i), y(t_i)) = \sum_j \zeta_{a,j} \cos(\omega_j t_j + \varphi_j - k_{x,j} \Delta x(t_i) - k_{y,j} \Delta y(t_i)) \quad (12)$$

Die wesentlichen Unterschiede in der 3-D Superpositions-Methode, verglichen mit der 2-D Superpositions-Methode sind in Abb. 21 dargestellt. Abb. 20 zeigt ein typisches multidirektionales Spektrum, wie es sich aus der Analyse der Radarbilder mit dem *WaMoS II*[®] System ergibt. Spaltenweise sind Amplitude, Kreisfrequenz, Richtungsinformation in Form der Wellenzahlen (k_x, k_y) sowie die Phasenverschiebung jeder einzelnen harmonischen Komponente aufgetragen.

wave component	amplitude	angular frequency	wave number x-direction	wave number y-direction	phase angle
	ζ_a	ω	k_x	k_y	φ
1	0.124	0.698	0.12	-0.02	1.98
2	0.109	0.621	0.15	-0.07	2.61
3	0.0963	0.621	0.125	-0.10	5.82
:	:	:	:	:	:
14000	0.0032	0.931	0.105	-0.175	6.2
:	:	:	:	:	:
37000	0.0012	1.32	-0.11	0.025	5.33

Abb. 20: Multidirektionales Spektrum in Tabellenform

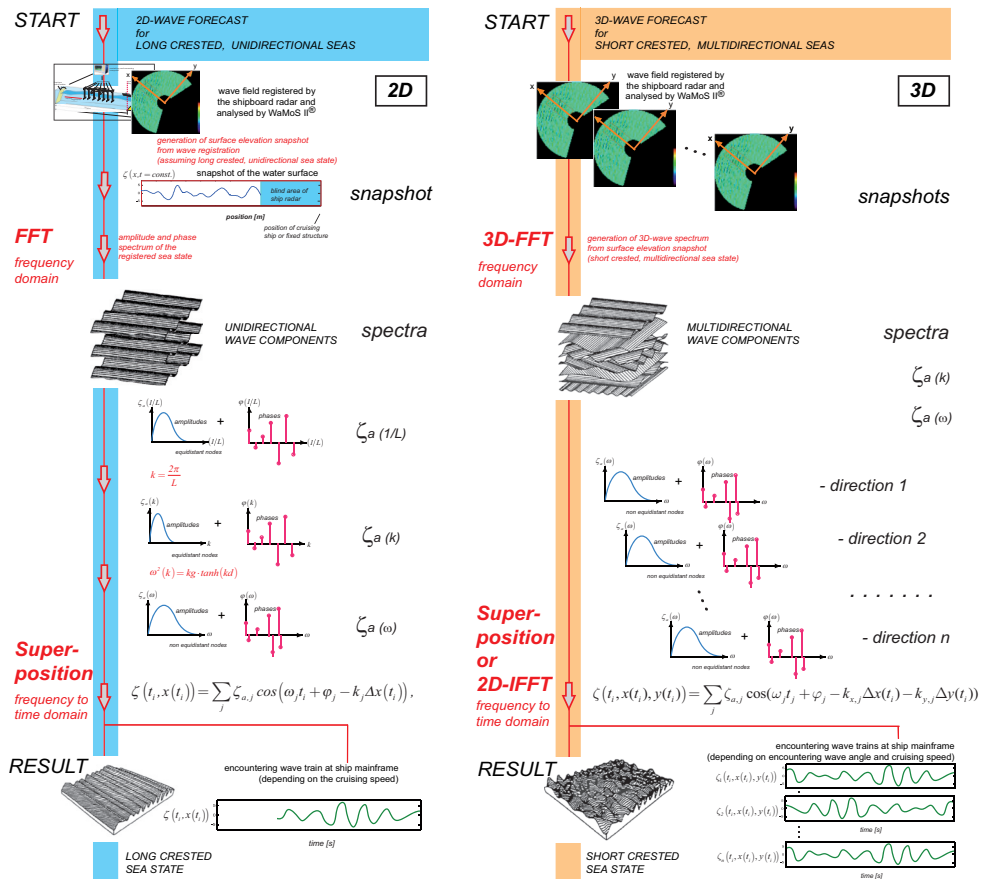


Abb. 21: Methoden zum ‚Wave Forecast‘: ‚2-D Wave Forecast‘ (linke Seite), ‚3-D Wave Forecast‘ (rechte Seite)

Eine wichtige Randbedingung für die Berechnung ergibt sich aus der Zusatzinformation, ob das Seegangsspektrum als „coming from“ Spektrum oder als „going to“ Spektrum definiert ist. Je nachdem Ändert sich die Ausbreitungsrichtung der einzelnen Wellenkomponenten. Abb. 22 veranschaulicht den Unterschied. #

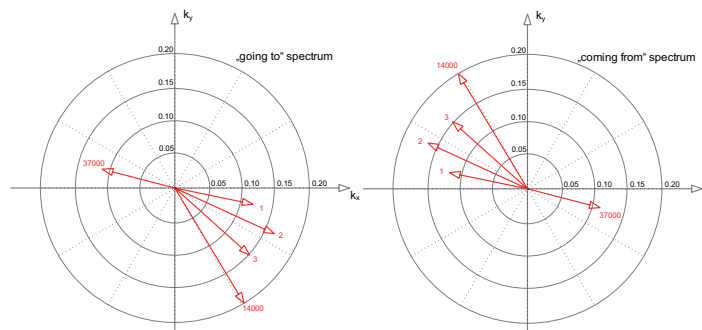


Abb. 22: Wellenkomponenten und ihr Einfallswinkel in Abhängigkeit der Definition als „going to“ oder „coming from“ Spektrum

Abb. 23 gibt ein Beispiel für die mit dieser Methode berechnete Wellenausbreitung in Abhängigkeit der Zeit. Es wurden für drei verschiedene Zeitpunkte $t = 0$ s, $t = 36,800$ s und $t = 78,523$ s jeweils der Seegang im gesamten Radarbereich berechnet. Zu Darstellungszwecken wird nur jeweils einer der vier Quadranten des Radarbildes gezeigt. Die Berechnung wurde tatsächlichen Radarmessungen für die drei Zeitpunkte gegenübergestellt und zeigt sehr gute Übereinstimmungen.

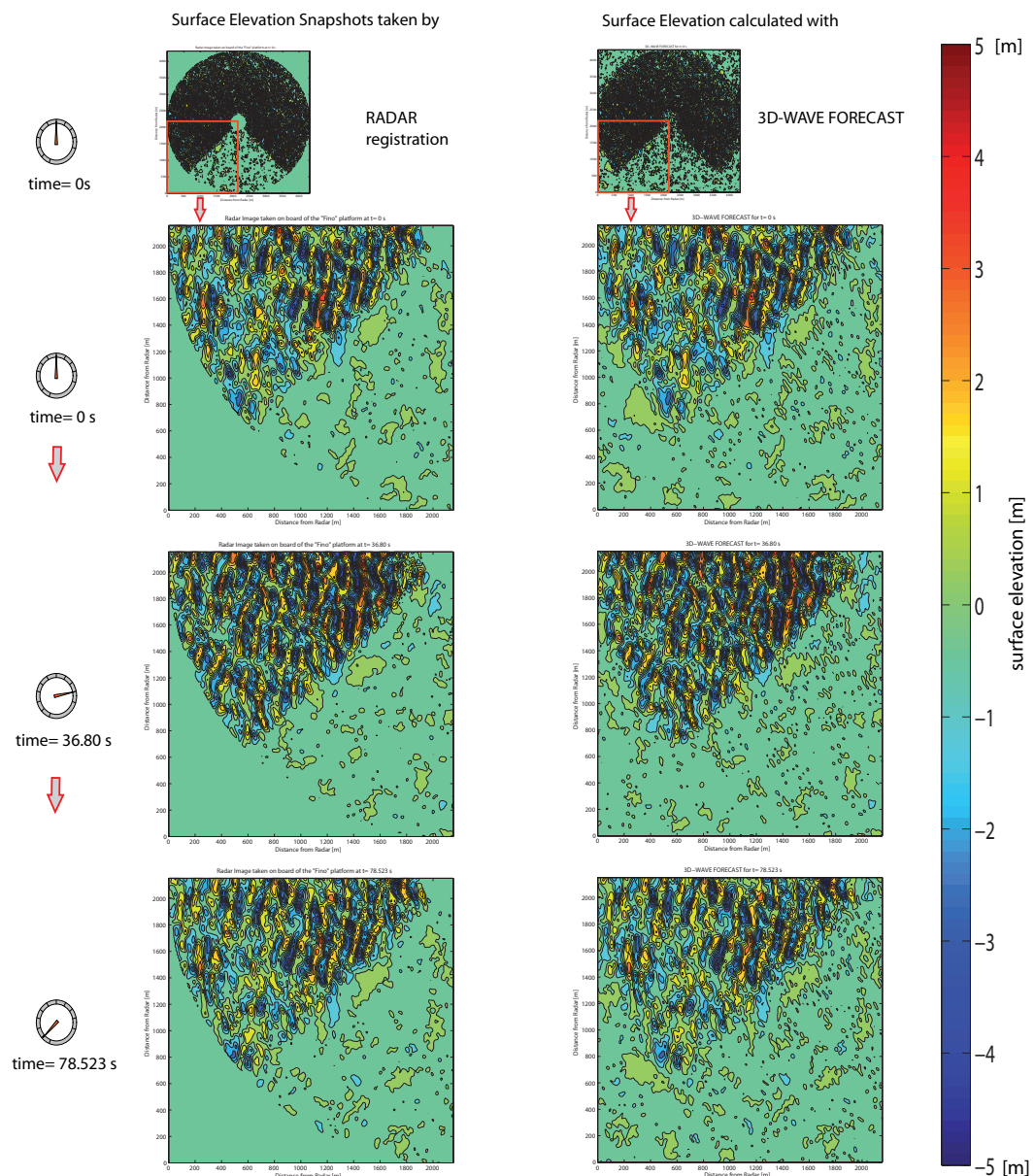


Abb. 23: Vergleich der mit der '3D-Wave Forecast' Methode vorausberechneten Wellenausbreitung mit Radarmessungen zu drei verschiedenen Zeitpunkten

5.2.3. ‚3D-Wave Forecast‘ – IFFT-Methode

Da für die Berechnung des Seegangs mit der ‚3D-Wave Forecast‘ – Superpositions-Methode Schleifen über die Zeit t , die räumlichen Koordinaten X und Y (je $4.320 \text{ m} / 7,5 \text{ m} = 576$) sowie alle Komponenten des Spektrums (ca. 37.000) notwendig sind ergibt sich, dass bereits die Berechnung nur eines Snapshots, für exakt einen Zeitpunkt

$$1 \cdot 576^2 \cdot 37.000 = 1,277 \cdot 10^{10}$$

Berechnungsschritte benötigt werden. Daraus ergibt sich das Problem, dass die Methode zwar sehr einfach und robust ist, aber für die schnelle Vorausberechnung der Seegangsentwicklung, d.h. der Berechnung vieler aufeinander folgender Snapshots, nicht geeignet ist. Da die im Laufe dieses Projekts entstandenen Methoden zur Seegangs- und später auch zur Schiffsbewegungsvorhersage über den eigentlichen Projektauftrag hinaus möglicherweise Anwendung in einem Just-In-Time Vorhersagesystem für die computergestützte Unterstützung der Schiffssteuerung finden soll, war die Beschleunigung der Berechnungsprozedur zwingend notwendig.

Das vom Projektpartner *OWS*, mittels Radar und *WaMoS II*[®] bereitgestellte Seegangsspektrum wird auf Basis einer 3-dimensionalen FFT aus 32 aufeinander folgenden Snapshots der Wasseroberfläche erzeugt. Der Vorteil dieser FFT im Vergleich zu der in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten 1-dimensionalen FFT mit nachgeschalteter Umrechnung der inversen Wellenlänge in Kreisfrequenzen besteht darin, dass die 3-dimensionale FFT ein Spektrum mit äquidistanten Stützstellen erzeugt. Dieses Spektrum lässt sich somit durch eine Inverse FFT wieder in einen Snapshot der Wasseroberfläche zurücktransformieren.

In dieser Anwendung wird für die Rücktransformation eine 2-dimensionale IFFT verwendet, welche als Ergebnis den Seegang für genau einen beliebigen Zeitpunkt berechnet. Dazu müssen die in Form von Betrag und Phase vorliegenden spektralen Komponenten des Seegangsspektrums zuerst in komplexe Zahlen umgewandelt werden. Je nachdem für welchen Zeitpunkt man einen Snapshot berechnen möchte, müssen vorab die zu den einzelnen Komponenten gehörenden Phaseverschiebungen neu berechnet werden. Im folgenden müssen diese komplexen Komponenten entsprechend ihrer zugehörigen Richtungsinformationen (k_x, k_y) in eine Matrix eingeordnet werden, die, aufgespannt über eben diesen direktionalen Wellenzahlen k_x und k_y , schließlich das gesamte Seegangsspektrum in komplexer Form enthält. Die Größe der Matrix ist festgelegt durch die räumliche Auflösung der Radarbilder mit denen das Spektrum ursprünglich berechnet wurde. Jede Zelle dieser Matrix enthält somit genau eine Wellenkomponente, die aus der durch das Zahlenpaar (k_x, k_y) eindeutig definierten Richtung kommt oder in diese läuft (je nach „coming from“ bzw. „going to“ Spektrum).

Das Programm *Matlab*, das zur Entwicklung dieser Methoden genutzt wurde stellt Spektren stets als komplexes + konjugiert komplexes Spektrum dar. Deshalb müssen auch die eben beschriebenen Matrizen symmetrisch um ihren Ursprung ($k_x = 0, k_y = 0$) sein, wobei die komplexen Spektralwerte auf der einen Seite der Symmetrieachse und die konjugiert komplex Spektralwerte auf der anderen Seite der Symmetrieachse stehen. Es ergeben sich schlussendlich vier Matrizen - zwei, wie eben beschrieben und zwei separate, die nur die Werte, welche genau die Werte, die direkt auf den X - bzw. Y -Achsen liegen, beinhalten. Abb. 24 veranschaulicht die Aufteilung der Matrizen.

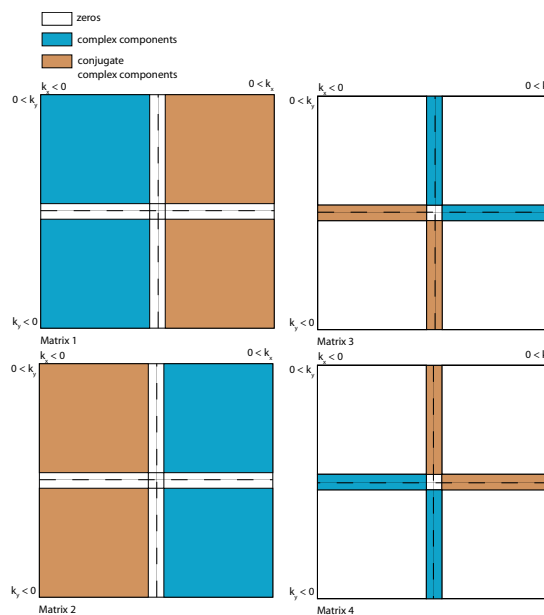


Abb. 24: Zuordnung der Komponenten des Seegangsspektrums in die komplexe Matrix aufgespannt über (k_x, k_y)

Da das Seegangsspektrum mehrere Komponenten haben kann, die aus der gleichen Richtung kommen und auch noch unterschiedliche Phaseninformationen besitzen, und Zellen der Matrix nicht doppelt belegt sein können, müssen erst alle „doppelten“ Werte des Spektrums aussortiert werden. Je nach Häufigkeit der Belegung bestimmter Wertepaare wird das ursprüngliche Seegangsspektrum somit in j Unterspektren zerlegt. Die Aufteilung in Matrizen erfolgt dann für jedes Unterspektrum.

Jede einzelne Matrix kann dann mittels 2-dimensionaler Inverser Fast Fourier Transformation in einen Snapshot der Wasseroberfläche für den gewählten Zeitpunkt transformiert werden. Den tatsächlichen Snapshot der Wasseroberfläche zu diesem Zeitpunkt erhält man abschließend durch Superposition der aus den einzelnen Matrizen berechneten Snapshots. Abb. 25 veranschaulicht den gesamten Prozess.

Beide Methoden, die ‚3D-Wave Forecast‘ – Superpositions-Methode sowie die ‚3D-Wave Forecast‘ – IFFT-Methode liefern exakt die gleichen Ergebnisse, mit dem Unterschied, dass die ‚3D-Wave Forecast‘ – IFFT-Methode bis zu 99% der Rechenzeit einspart. Somit ist die ‚3D-Wave Forecast‘ – IFFT-Methode exzellent für die schnelle Vorhersage und somit auch für ein Just-In-Time Decision Support System geeignet.

Die ausführliche Darstellung aller vorgestellten Methoden zur Seegangsvorhersage findet sich in den zu diesem Thema im Laufe des Projekts entstandenen Publikationen (Testa, D. (2006), Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., Stück, R., (2007), Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., Hessner, K., (2008), Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., (2009b) und Claus, G. F., Kosleck, S. und Testa, D. (2009a)).

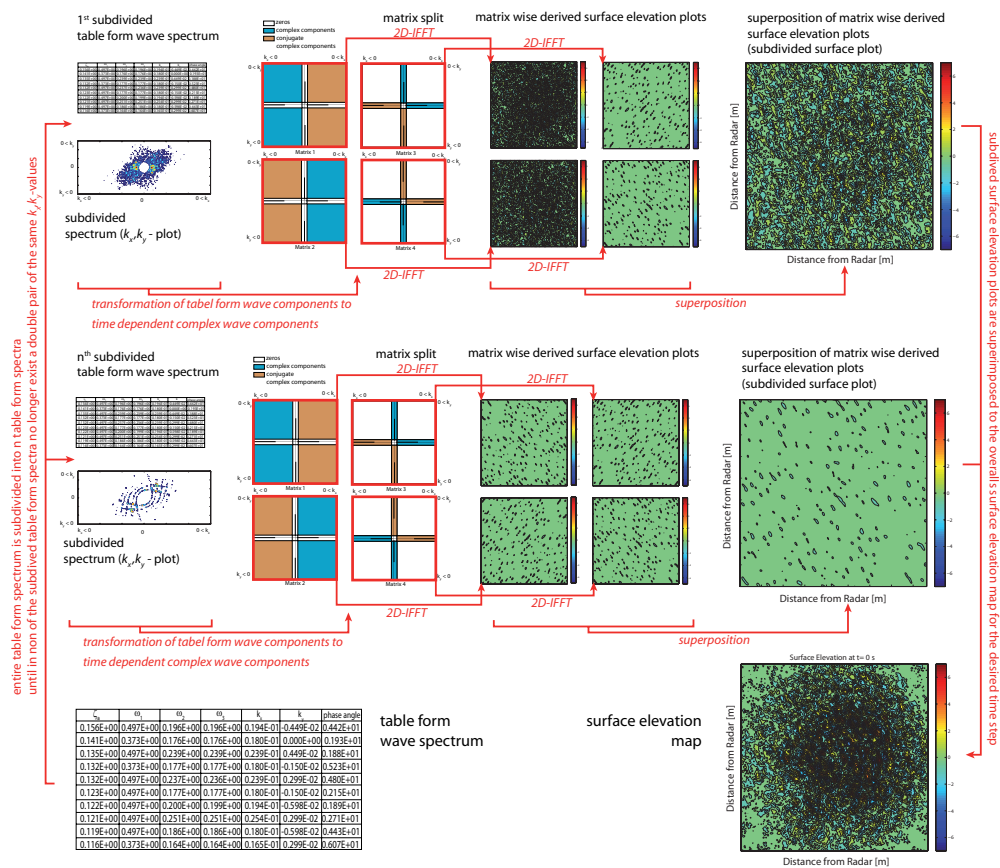


Abb. 25: Flußdiagramm der „2D-IFFT Methode“

5.2.4. „Ship Motion Forecast“

In Anbindung an die Vorhersage von Seegängen wurden im Rahmen dieses Projekts ebenfalls Methoden entwickelt mit denen sich, ausgehend vom vorhergesagten Seegang, auch die zu erwartenden Bewegungen als Resultat von Welle/Struktur Interaktion berechnen lassen. Diese Methoden im Zusammenspiel mit der Seegangsvorhersage bieten erweiterte Möglichkeiten für die Identifizierung kritischer Situationen im Schiffsbetrieb, speziell in schwerem Seegang.

Basierend auf den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Methoden zur Seegangsvorhersage werden zuerst einmal richtungsabhängige Begegnungswellenzüge für die Schiffsposition (z.B. entlang des gesetzten Kurses) berechnet. Diese werden mittels FFT in den Frequenzbereich transformiert. Durch Multiplikation des berechneten richtungsabhängigen Spektrums mit den dazugehörigen, ebenfalls richtungsabhängigen Übertragungsfunktionen für die 6 Freiheitsgrade des Schiffs (3 translatorische und 3 rotatorische) erhält man das Antwortspektrum. Durch Anwendung der IFFT werden die Antwortspektren wieder in den

Zeitbereich überführt und man erhält die zeitabhängige Antworten, d.h. die Bewegungen des Schiffs in 6 Freiheitsgraden (surge, sway, heave, roll, pitch und yaw).

5.2.4.1. Vorhersage von Begegnungswellenzügen

Wie bereits vorab angedeutet müssen für die Berechnungen von seegangsinduzierten Schiffsbewegungen zu aller erst die Begegnungswellenzüge an der jeweiligen Schiffsposition, in diesem Fall dem Schwerpunkt des Schiffs, berechnet werden.

Ist die Position des Schiffs über einen längeren Zeitraum bekannt, z.B. entlang des gesetzten Kurses, so kann für die entsprechenden Punkte im Raum in Abhängigkeit der Zeit die jeweilige Wasserspiegelauslenkung einfach und schnell mit der ‚3D-Wave Forecast‘ – Superpositions-Methode (siehe Abschnitt 5.2.2) berechnet werden. Die ‚3D-Wave Forecast‘ – Superpositions-Methode ist für diesen Zweck ausreichend schnell, da in diesem Fall für jeden Zeitpunkt t_i die Wellenerhebung nur an jeweils einem Punkt im Raum berechnet werden muss.

Die Antwort des Schiffs als Reaktion auf einen Wellenzug fällt unterschiedlich aus, je nachdem aus welcher Richtung die Wellen auf das Schiff zulaufen, d.h. die Antwort des Systems ist richtungsabhängig. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, dürfen nur Wellenkomponenten die aus ein und der selben Richtung auf das Schiff einlaufen zu einem Begegnungswellenzug aus dieser Richtung zusammengefasst werden. Bei einem Spektrum mit 37.000 Werten und mehreren tausend Anlaufrichtungen wird diese Herangehensweise schnell unrealistisch, weshalb das schiffsfeste Koordinatensystem lediglich in eine kleine Anzahl von fächerförmigen Sektoren aufgeteilt wurde (z.B. 12 Stück á 30°), so dass im folgenden alle Wellenkomponenten die durch den gleichen Sektor einlaufen zu einem Begegnungswellenfeld aus diesem Sektor zusammengefasst werden.

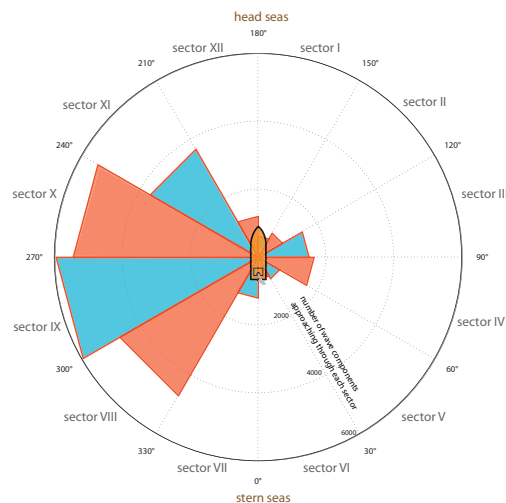


Abb. 26: in Sektoren unterteiltes schiffsfestes Koordinatensystem mit Anzahl der durch den jeweiligen Sektor auf das Schiff zulaufenden Wellenkomponenten

Abb. 26 zeigt die Aufteilung des schiffsfesten Koordinatensystems in 12 Sektoren. Abb. 27 zeigt an einem Beispiel die sektorenweise berechneten Begegnungswellenzüge, zum einen für eine fest verankerte Struktur und zum anderen für ein mit sich änderndem Kurs fahrendes Schiff.



Abb. 27: In Sektoren unterteiltes globales Koordinatensystem (links); in Sektoren unterteiltes schiffsfestes Koordinatensystem (mitte), sektorenweise berechnete Begegnungswellenzüge

Die Begegnungswellenzüge für die einzelnen Sektoren ändern sich nicht nur in Abhängigkeit vom gefahrenen Kurs, sondern auch in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit. Wie sich die Geschwindigkeitsänderung auf des Spektrum des Begegnungswellenzugs auswirkt zeigt Abb. 28. Nicht nur im Zeitbereich unterscheiden sich die Begegnungswellenzüge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit deutlich voneinander, sondern auch deren Spektren unterscheiden sich. Je schneller man den Wellen entgegen fährt, umso höher werden die Begegnungsfrequenzen – die Spektralwerte verschieben sich, wie in Abb. 28 zu sehen, nach rechts und umgekehrt. Mit diesen sektorenweise berechneten Begegnungswellenzügen kann jetzt für jeden Sektor und jeden Freiheitsgrad die entsprechende Antwort ermittelt werden. Die Ablauf der Berechnung ist in Abb. 29 skizziert.

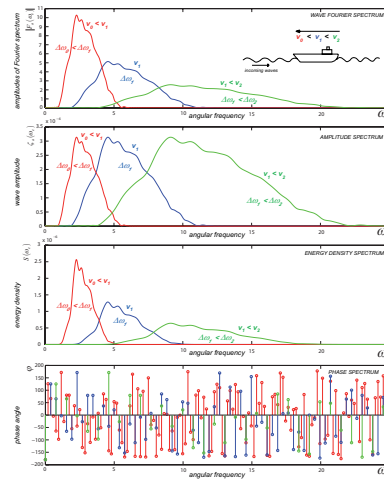


Abb. 28: Fourier-, Amplituden und Energiedichtespektrum des Begegnungswellenzugs in Abhängigkeit der Fahrtgeschwindigkeit

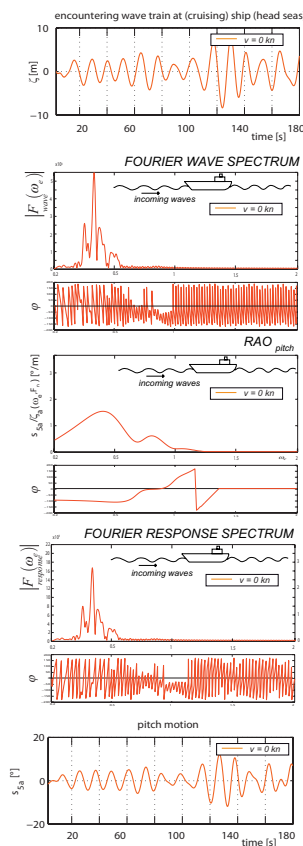


Abb. 29: Beispiel für die Berechnung der Schiffsbewegung für einen Freiheitsgrad (von oben nach unten: Seegang im Zeitbereich, Fourierspektrum des Seegangs (Amplituden- und Phasenspektrum), Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung (Amplituden- und Phasenspektrum), Antwortspektrum der Bewegung (Amplituden- und Phasenspektrum), Antwort (Stampfbewegung) im Zeitbereich)

5.2.4.2. Übertragungsfunktionen

Die für die Berechnung, wie in Abb. 29 skizziert, benötigten Übertragungsfunktionen (RAOs) werden mit dem potentialtheoretischen Diffraktions/Radiations-Programm *WAMIT* berechnet. Die RAOs geben die frequenzabhängige Antwort des Systems auf harmonische Anregungen an und werden im Frequenzbereich dargestellt. Genau wie das Spektrum des Begegnungsseegangs sind auch die RAOs Geschwindigkeitsabhängig. *WAMIT* berechnet die RAOs für $F_n = 0$, d.h. $v = 0$ kn und kann standardmäßig keine RAOs für Fahrtgeschwindigkeiten $v \neq 0$ kn berechnen.

Aus der Newtonschen Bewegungsgleichung,

$$M\ddot{\underline{s}} + A\dot{\underline{s}} + B\underline{s} + C\underline{s} = F_E \quad (13)$$

in der \underline{s} die Bewegung, $\dot{\underline{s}} = i\omega s$ die Geschwindigkeit und $\ddot{\underline{s}} = -\omega^2 s$ die Beschleunigung beschreibt, ergibt sich, dass die RAOs von der Begegnungsfrequenz ω_e abhängig sind. Aus diesem Grund müssen die Frequenzen ω_0 (für $F_n = 0$) zunächst nach Gleichung Gl. (14) in Begegnungsfrequenzen ω_e (für $F_n \neq 0$) umgerechnet werden.

$$\omega_e = \omega_0 + \frac{\omega_0^2 \cdot v}{g} \cdot \cos \mu \quad (14)$$

Zusätzlich werden, ebenfalls geschwindigkeitsabhängig, die Koeffizienten der hydrodynamischen Massenmatrix A_{ij} , sowie der Potentialdämpfungsmatrix B_{ij} (zur Berücksichtigung viskoser Dämpfungen, speziell für „Rollen“ [B₄₄]) angepasst (siehe Gl. (15) - Gl. (25)). Durch Lösen der Bewegungsgleichung lassen sich anschließend die RAOs für $v \neq 0$ kn berechnen.

$$A_{33} = \int \underbrace{a_{33}}_{WAMIT\ output} dx \quad (15)$$

$$A_{35} = - \int \underbrace{xa_{33}}_{WAMIT\ output} dx - \frac{v}{\omega_e^2} B_{33} \quad (16)$$

$$A_{53} = - \int \underbrace{xa_{33}}_{WAMIT\ output} dx + \frac{v}{\omega_e^2} B_{33} \quad (17)$$

$$A_{55} = \int \underbrace{x^2 a_{33}}_{WAMIT\ output} dx + \frac{v}{\omega_e^2} A_{33} \quad (18)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$B_{33} = \underbrace{\int b_{33} dx}_{WAMIT\ output} \quad (20)$$

$$B_{35} = - \underbrace{\int x b_{33} dx}_{WAMIT\ output} + \nu A_{33} \quad (21)$$

$$B_{53} = - \underbrace{\int x b_{33} dx}_{WAMIT\ output} - \nu A_{33} \quad (22)$$

$$B_{55} = \underbrace{\int x^2 b_{33} dx}_{WAMIT\ output} + \frac{\nu}{\omega_e^2} B_{33} \quad (23)$$

$$B_{44} = \frac{\rho g V G M}{\sqrt{\omega_o}} B_{44}^* \quad \text{with } B_{44}^* = \frac{\varphi_{stat}}{\varphi_{res}} \quad (24)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} & 0 & B_{15} & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ B_{31} & 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & B_{62} & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \quad (25)$$

potential damping matrix B

Die geschwindigkeitsabhängigen Änderung werden an einem Beispiel für RAOs, berechnet für „head seas“ (180°), deutlich. Mit steigender Geschwindigkeit erhöhen sich die Begegnungsfrequenzen und die RAOs verschieben sich in den höherfrequenten Bereich.

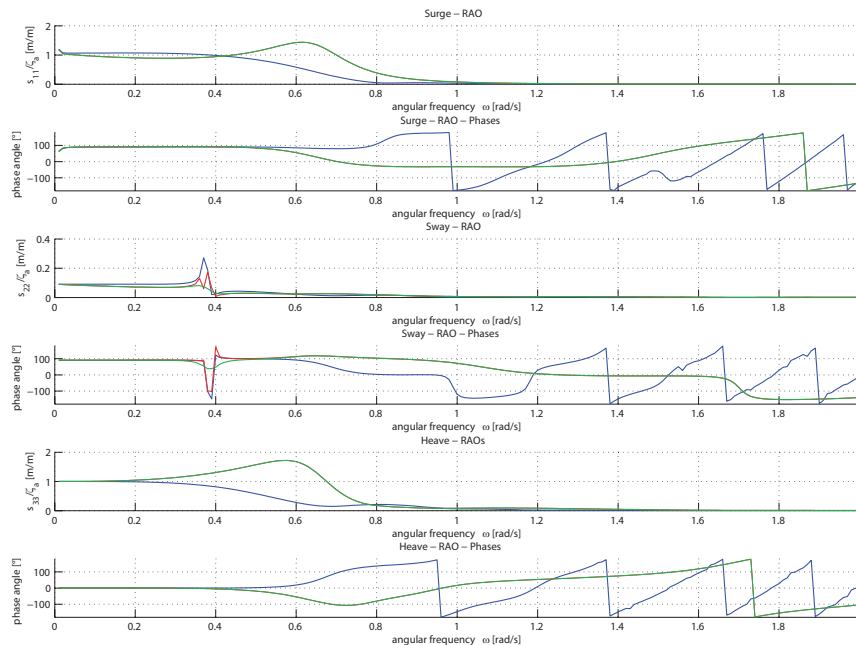


Abb. 30: translatorische RAOs in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Begegnungswinkel 180° (head seas) (blau: $\nu = 0$ kn ohne viskose Rolldämpfung, rot: $\nu = 14$ kn ohne viskose Rolldämpfung, grün: $\nu = 14$ kn mit viskoser Rolldämpfung)

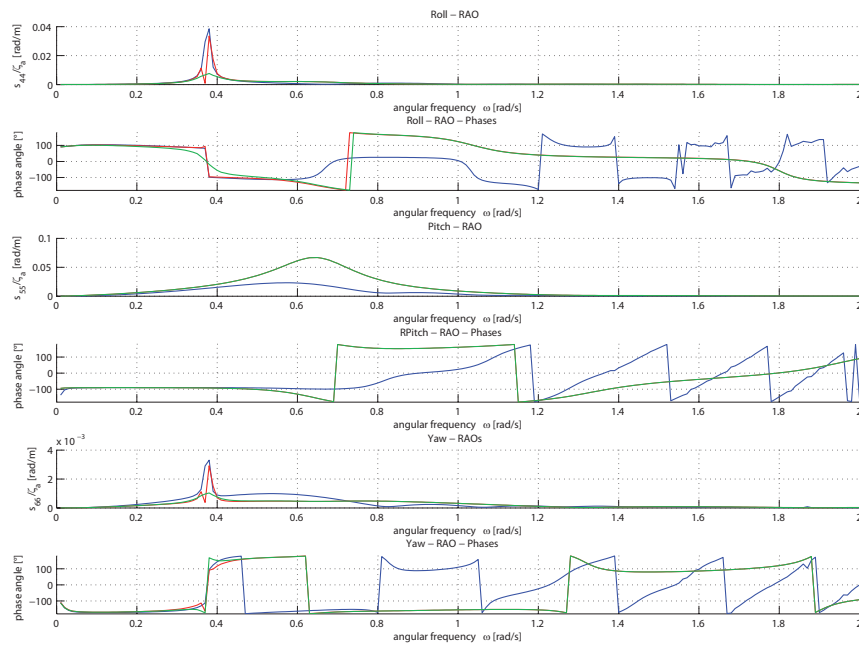


Abb. 31: rotatorische RAOs in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Begegnungswinkel 180° (head seas) (blau: $v = 0$ kn ohne viskose Rolldämpfung, rot: $v = 14$ kn ohne viskose Rolldämpfung, grün: $v = 14$ kn mit viskoser Rolldämpfung)

Exemplarisch wird der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Spektrum des Begegnungseegangs sowie auf die RAOs am Beispiel einer Berechnung für die Stampfbewegung in Abb. 32 gezeigt.

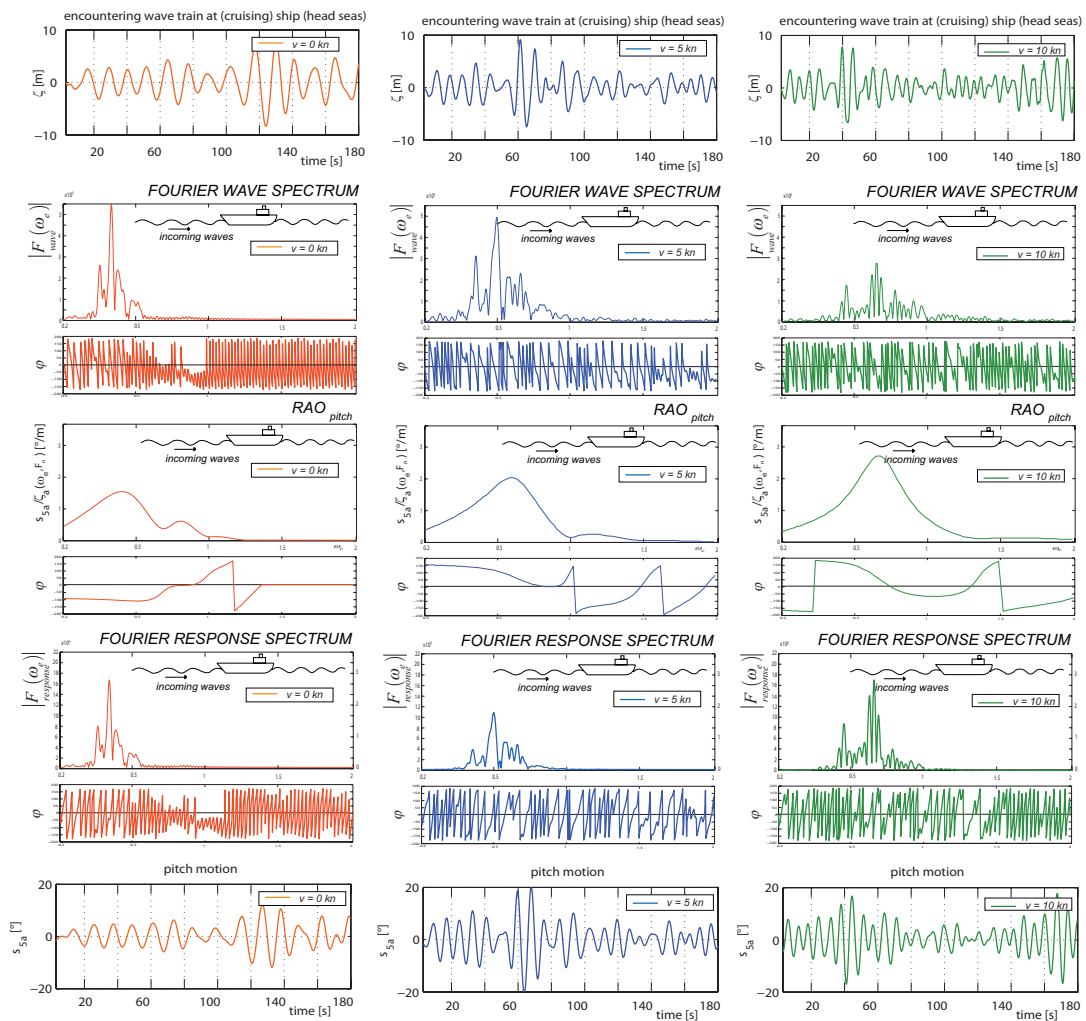


Abb. 32: Resultierende Stampfbewegung in Abhängigkeit der Fahrtgeschwindigkeit (orange: $v = 0$ kn, blau: $v = 5$ kn, grün: $v = 10$ kn)

5.2.4.3. Berechnung der Schiffsbewegung

Stehen für alle Sektoren Begegnungswellenzüge und RAOs zur Verfügung, so lassen sich die Antworten für alle 6 Freiheitsgrade sektorenweise, nach dem Schema in Abb. 29, berechnen. Die Gesamtantworten ergeben sich durch einfache Superposition der sektorenweise berechneten Antworten. Abb. 33 gibt nochmal eine Übersicht über die gesamte Berechnung.

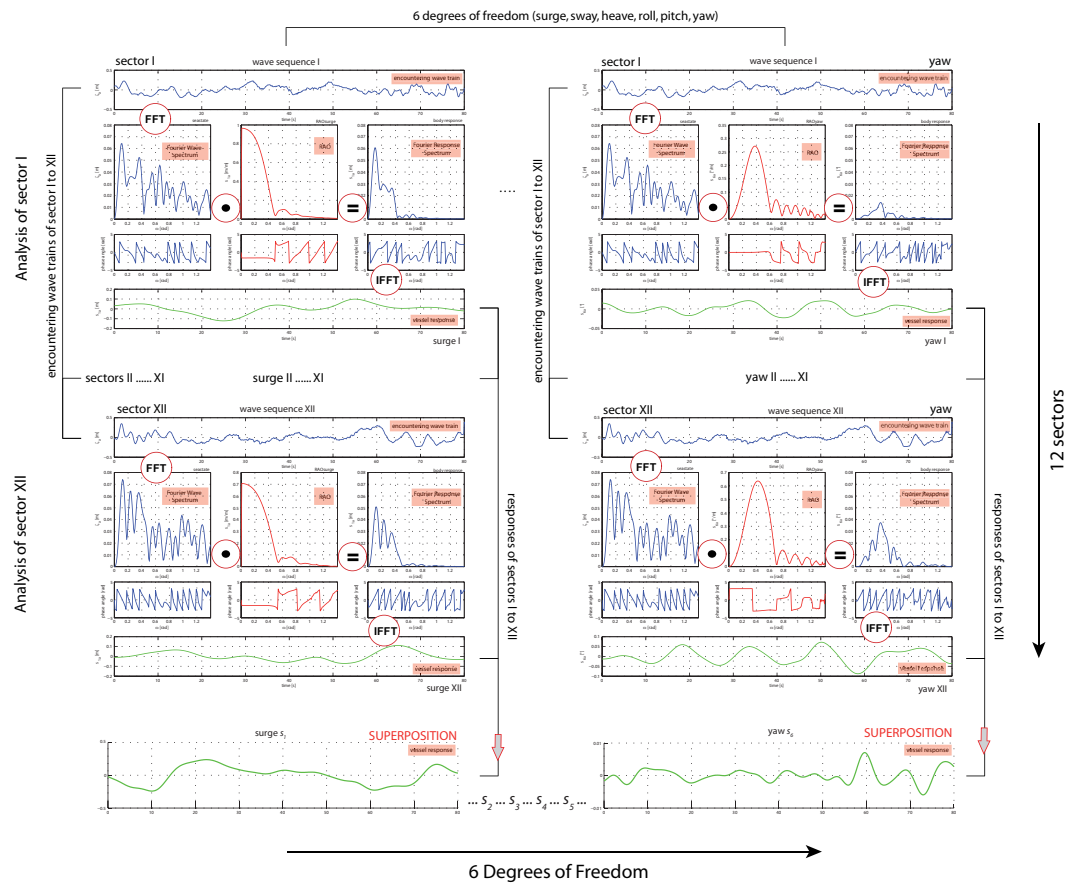


Abb. 33: Sektorenweise Berechnung der Schiffsbewegungen (im Frequenz- und Zeitbereich). Die Gesamtantwort des Systems für jeden Freiheitsgrad ergibt sich durch Superposition der Sektorenweise berechneten Antworten.

5.2.5. Beispielrechnung

Im folgenden wird anhand eines konkreten Beispiels die Anwendung der Wellenvorhersage (siehe Abb. 34) und der darauf aufbauenden Vorhersage der Schiffsbewegungen (siehe Abb. 35 und Abb. 36) für einen Zeitraum von 180 s veranschaulicht. Abb. 36 zeigt dabei auf, wie sich die Schiffsantwort ändern würde, wenn man die Geschwindigkeit des Schiffs reduzieren, bzw. erhöhen würde. Durch Auswertung der vorausberechneten Daten lassen sich somit gefährliche Situation vorab identifizieren und es können ggf. Gefahren abgewandt werden. Somit erhält man ein Werkzeug, mit dem sich schnell wertvolle Informationen für die Navigation des Schiffs erfassen lassen.

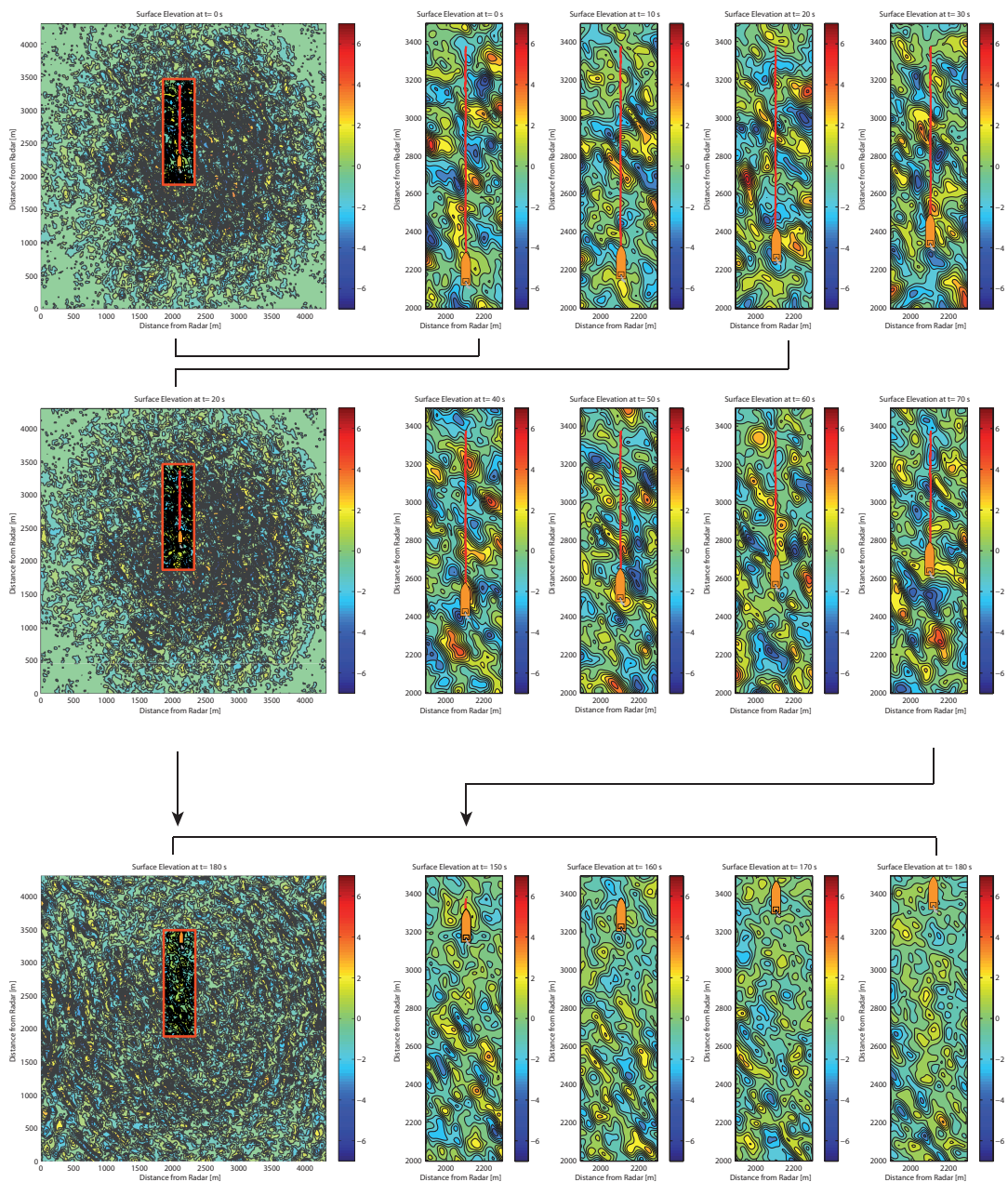


Abb. 34: Beispiel einer Seegangsvorhersage im Nahbereich des Schiffs für einen Zeitraum von 180 s

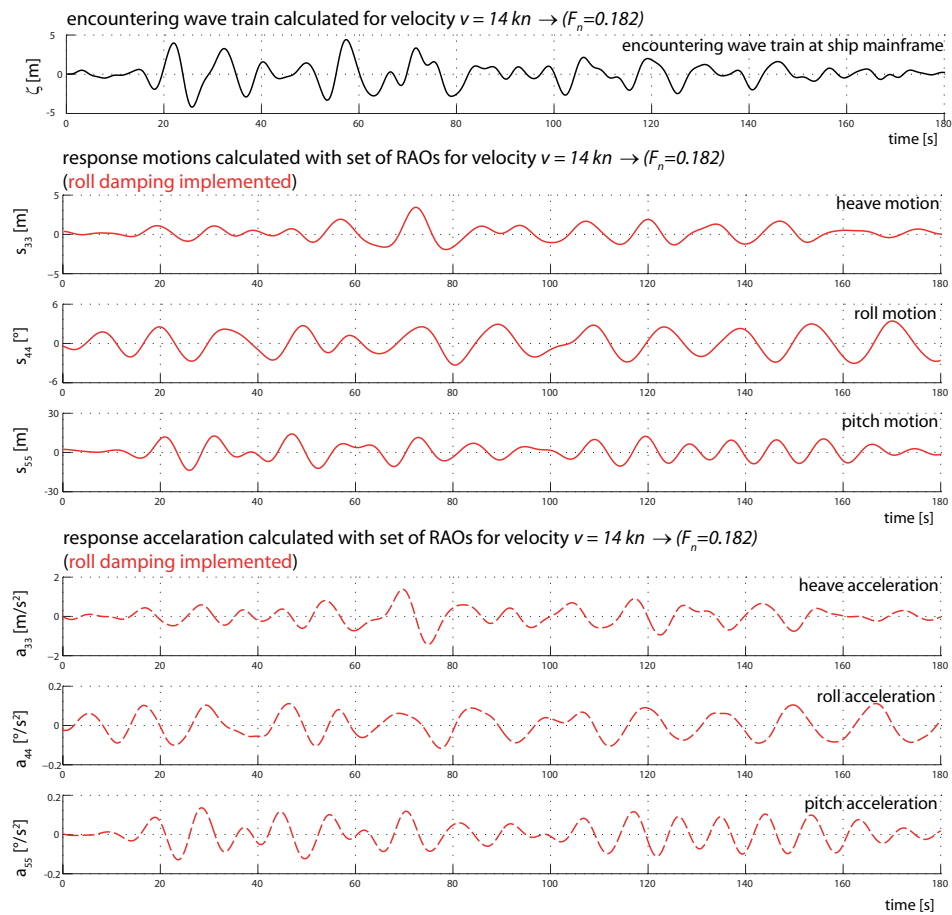


Abb. 35: Begegnungswellenzug am Ort des Schiffs und resultierende Tauch-, Roll- und Stampfbewegungen bei einer Fahrt mit 14 kn für den in Abb. 34 dargestellten Fall

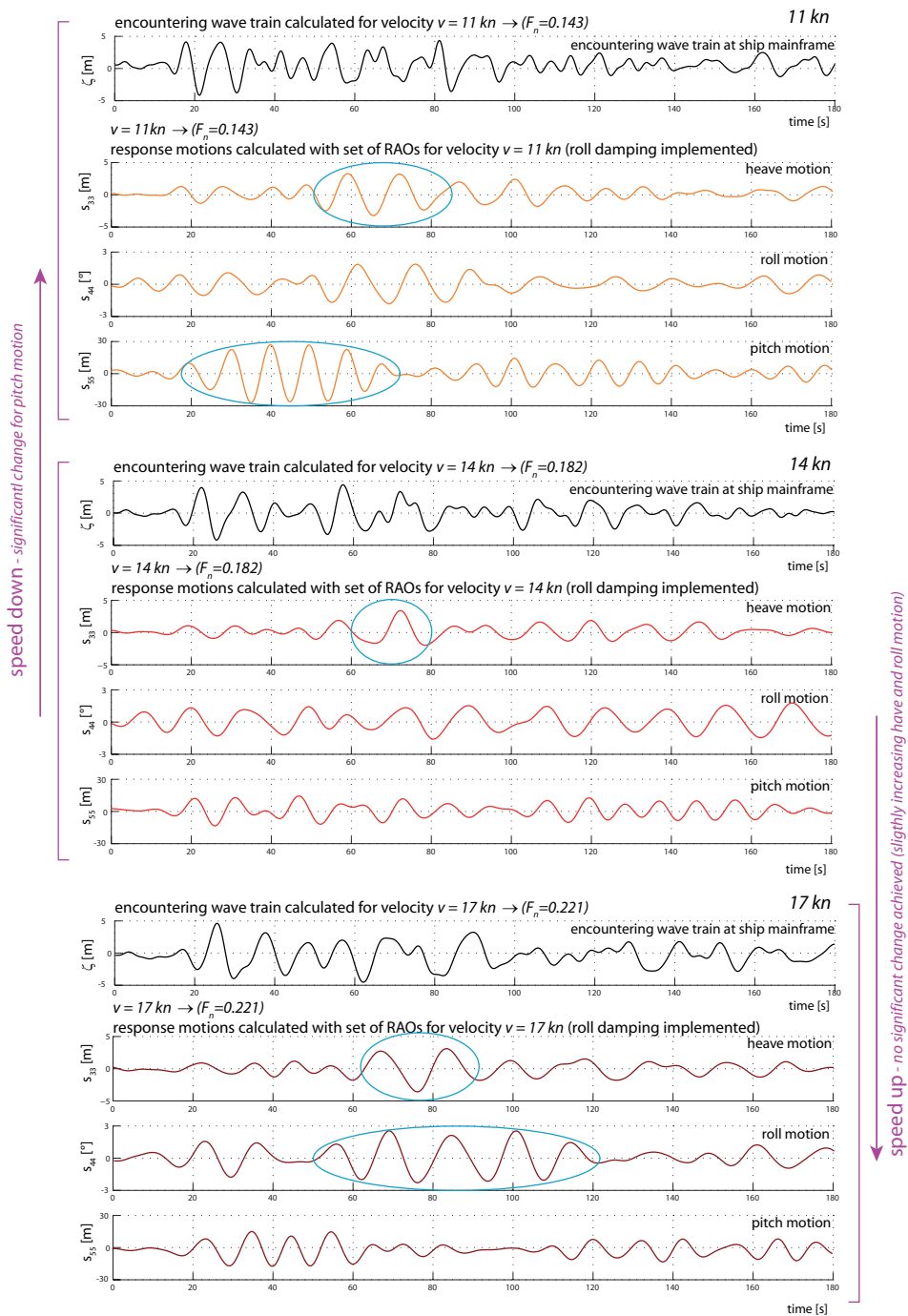


Abb. 36: Änderung der Begegnungswellenzüge und der resultierenden Bewegungen bei sich ändernder Fahrtgeschwindigkeit (oben: 11 kn, mitte: 14 kn, unten: 17 kn)

5.2.6. Veröffentlichungen

Im Rahmen dieses Projektteils sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

- national:

„Testa, D. (2006): Vorhersage kritischer Wellengruppen aus See-
gangsregistrierungen im Ortsbereich. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin“

- international:

„Claus, G. F., Kosleck, S. und Testa, D. (2009a): CASH- Decision
Support System for Computer Aided Ship Handling. In Jahrbuch der Schiffbautech-
nischen Gesellschaft 2009, Hamburg, Germany.“

„Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., Stück, R., (2007): Forecast of
Critical Wave Groups from Surface Elevation Snapshots, OMAE 2007 - 26th Interna-
tional Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, USA.“

„Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., Hessner, K., (2008): Forecast of
Critical Situations in Short Crested Seas, OMAE 2008 - 27th International Conference
on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal.“

„Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., (2009b): Critical Situations of
Vessel Operations in Short Crested Seas – Forecast and Decision Support System – ,
OMAE 2009 - 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engi-
neering, Honolulu, Hawaii, USA.“

5.3. zu Projektteil 3: Numerische Modellierung von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellen

Für die Entwicklung und sichere Konstruktion von Schiffen und Offshore-Strukturen ist eine genaue Kenntnis der hydrodynamischen Lasten von entscheidender Bedeutung. Die genaue Berechnung der Druckverteilung am Schiff / an der Struktur ist unerlässlich, um Belastungen und Bewegungen genau vorhersagen zu können. Im Rahmen des dritten Teilprojekts der TUB wurden Verfahren zur Approximation des Drucks in irregulären Seegängen entwickelt. Ziel ist die Berechnung von Wellenlasten auf die Außenhaut eines beliebigen Schiffs oder einer beliebigen anderen Struktur.

Es wurden zwei verschiedene Verfahren entwickelt:

1. Approximation von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellenfeldern durch Überlagerung von Stokeswellen höherer Ordnung
2. ADAPTIVE STRETCHING: Modifizierung der linearen Wellentheorie zur Berechnung der Druckverteilung im langkämmigem und kurzkämmigem Seegang

Die entwickelten Verfahren dienen der Untersuchung von Wellenfeldern im Nahbereich von Schiffen und bieten somit eine verbesserte Grundlage zur Initialisierung von Drucklasten bei FEM-Strukturanalysen.

5.3.1. Approximation von Druckfeldern und Partikeldynamik in Wellenfeldern durch Überlagerung von Stokeswellen höherer Ordnung

Die Formulierung eines rationalen Verfahrens für die Berechnung von Wellenlasten im steilen, irregulären Seegang im Oberflächenbereich steht bis heute aus. Die Beschreibung von natürlichem Seegang durch Überlagerung vieler harmonischer Wellen hat sich als effizientes und genaues Werkzeug für die Darstellung der Wasseroberfläche, wie auch für die Wellengenerierung und Transformation erwiesen. Für die Berechnung der Wellenkinematik in Oberflächennähe ist sie ungeeignet. Wellentheorien höherer Ordnung bilden nur reguläre Wellen exakt ab, die keine Besonderheiten des natürlichen Seegangs wie die horizontale Asymmetrie und Wellenbrechen aufweisen.

Diese Effekte haben entscheidenden Einfluss auf die Wellenkinematik und damit auf die resultierenden Seegangslasten auf Schiffe und Offshore-Plattformen. Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Stokes-Approximation, eine neue Methode zur Berechnung der Wellenkinematik in steilen, unregelmäßigen Wellen mit bekannter Oberflächenauslenkung entwickelt. Basierend auf einem Perturbationsansatz interagierender Stokes-Wellen von Pierson, W. J. (1993), der auf sechs Wellenkomponenten erweitert und für den Einsatz in limitierter Wassertiefe angepasst wird, berechnet dieses Modell das Potential des irregulären Wellenzugs. Eine parametrische Lösung wurde mit Hilfe eines Subplex-Such-Algorithmusses auf die gegebene Oberfläche angepasst, die sowohl als zeitabhängige Registrierung, als auch als Oberflächenkontur gegeben sein kann.

Zur Validierung wurden Messungen von Partikelgeschwindigkeiten und den dynamischen Wellendrücken in Wellenkanälen herangezogen. Folgende Wellensignale wurden untersucht:

1. Ein fokussiertes, steiles Wellenpaket wird im frühen Stadium bestehend aus mehreren Einzelwellen durch Wellenpegel und Ultraschall-Geschwindigkeitssonde vermessen. Im Bereich des Fokus-Punktes wird die dynamische Kontur durch eine Reihe von Pegelmessungen aufgenommen, während gleichzeitig das Tiefenprofil der Geschwindigkeit mit einem Laser-Doppler-Velocimeter bestimmt wird. Es hat sich gezeigt, dass die Approximation durch Stokes-Wellen bis kurz vor dem Brechen der Welle gute Ergebnisse liefert. Mit dem so ermittelten Geschwindigkeitsfeld kann im Nachlauf ein CFD-Solver (z.B. Fluent) initialisiert werden, der den Brechvorgang der Welle korrekt simuliert.
2. Die „Yura Welle“ ist eine im Japanischen Meer gemessene Wellensequenz die eine Monsterwelle enthält. Sie wurde von Mori et al. (2000) vor der Küste Yuras gemessen und später im kleinen Wellenkanal der TU-Berlin im Maßstab von 1:120 nachgebildet. Es wurden Druck und Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt und mit konventionellen Wellentheorien sowie dem Stokes-Approximation verglichen.
3. Die Registrierung der „New Year Wave“, eine Wellensequenz, die am 1.1.1995 in der Nordsee von Haver, S. (2000) gemessen worden ist, wurde im Großen Wellenkanal der TU-Berlin im Maßstab 1:81 reproduziert. Der Wellenzug wurde sowohl im Zeit-, als auch im Ortsbereich aufgemessen. Ferner wurden Partikelgeschwindigkeiten in der kritischen Wellengruppe gemessen. Das Experiment wurde virtuell im numerischen Wellenkanal ‚WaveTUB‘ reproduziert, dessen Ergebnisse gute Übereinstimmung mit der Messung zeigen - sowohl hinsichtlich der nicht-linearen Wellenausbreitung, als auch hinsichtlich der Partikelgeschwindigkeiten in der Extremwelle. Die Stokes-Approximation zeigt, dass sich auch kurz vor dem Wellenbrechen die eigentliche Welle durch Überlagerung von Stokes-Wellen im Orts- und Zeitbereich gut wiedergeben läßt.

Es wurde gezeigt, dass die neue Approximationsmethode in allen Fällen exzellente Ergebnisse liefert. Das harmonische Superpositionsmodell, das die Dispersion für jede einzelne Wellenkomponente vorsieht, ist unverzichtbar für die Modellierung, Simulation und Transformation irregulärer und deterministischer Wellenzüge. Gleichzeitig können nur Theorien höherer Ordnung für regelmäßige Wellen die Kinematik im Wellenberg richtig darstellen. Die hier präsentierte und validierte Methode stellt eine Verbindung beider Konzepte dar, mit deren Hilfe, die Kinematik steiler, unregelmäßiger Wellenzüge schnell und zuverlässig ermittelt werden kann.

Das gesamte Verfahren wurde erstmals in Clauss, G. F., Stempinski, F., Stück, R. (2008) (liegt dem Bericht bei) veröffentlicht. Die ausführliche Beschreibung des Verfahrens, sowie dessen Validierung findet sich in der Dissertation von Florian Stempinski (Stempinski, F. (2009) (liegt dem Bericht bei)), welche im Rahmen dieses Projekts entstanden ist. Eine kleine Auswahl von Ergebnissen aus dieser Dissertation wird im folgenden dargestellt.

Abb. 37 bis Abb. 40 zeigen die Validierung der Methode anhand der horizontalen Geschwindigkeiten unter einem sich fokussierenden Wellenpaket. Die Validierung liefert exzellente Ergebnisse.

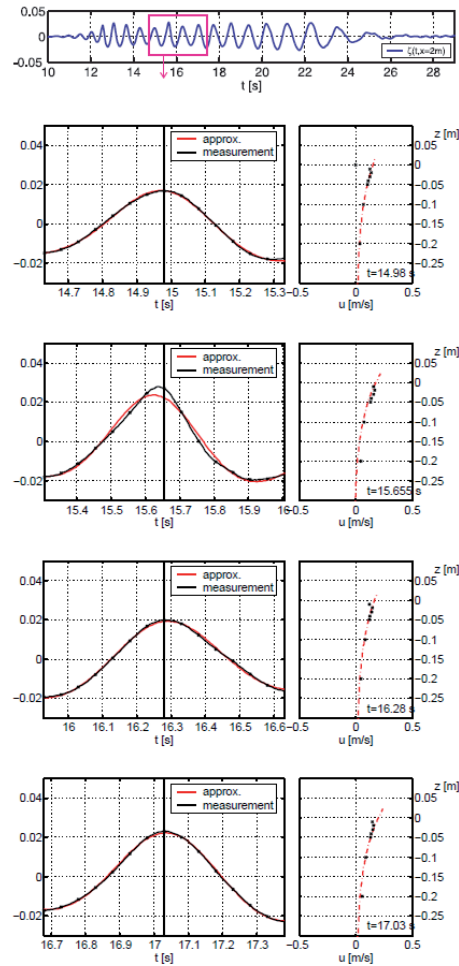


Abb. 37: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet)

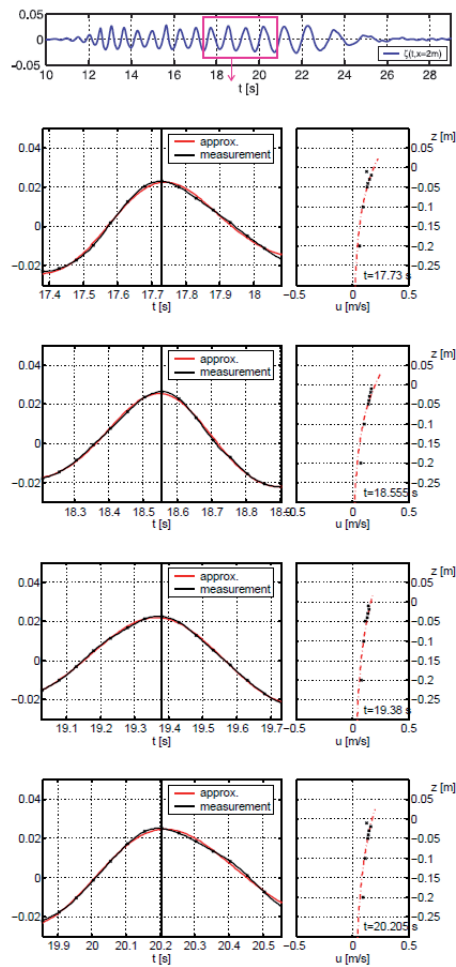


Abb. 38: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_2 unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet)

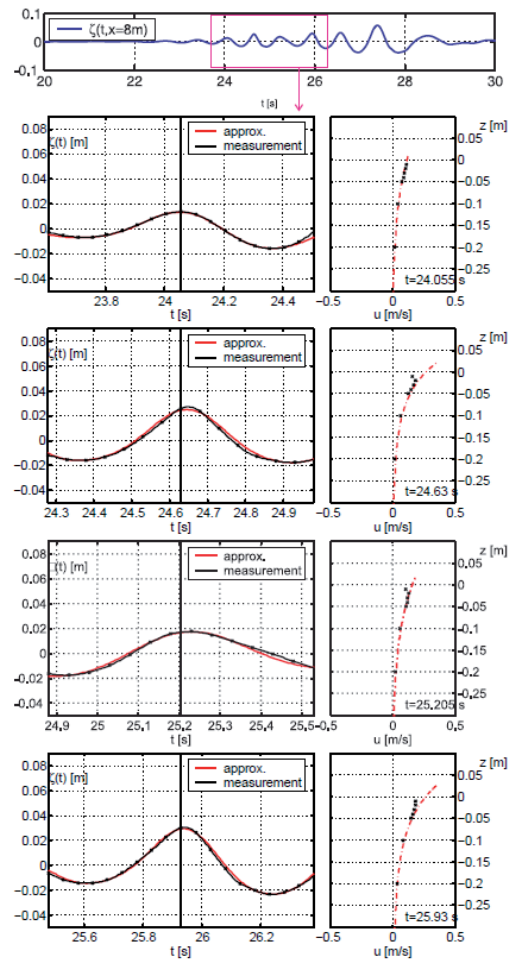


Abb. 39: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_i unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet)

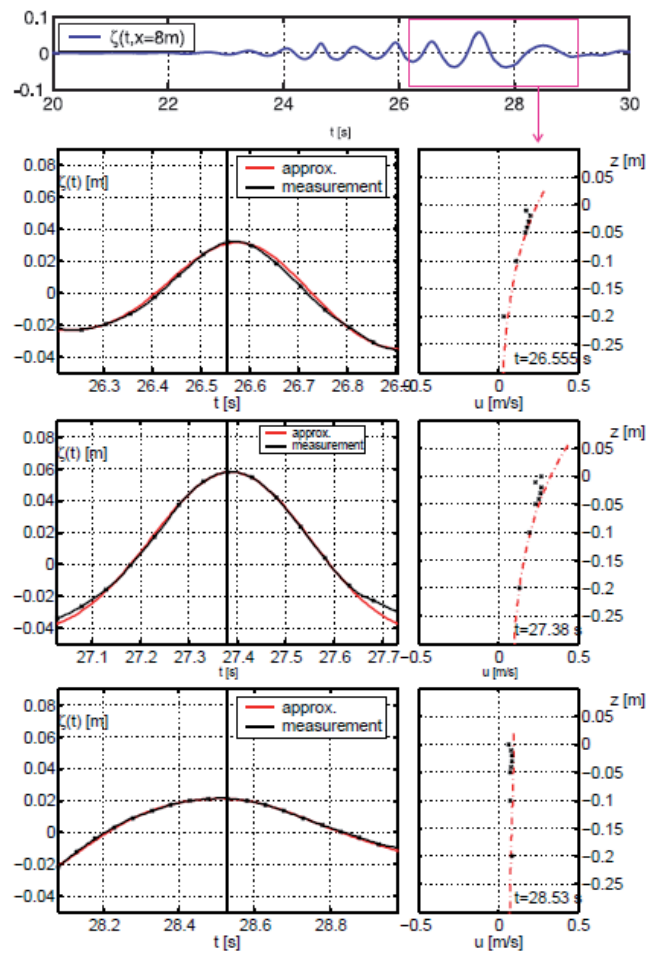


Abb. 40: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_i unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet)

Abb. 41 bis Abb. 43 zeigen die Validierung der Methode anhand der horizontalen Geschwindigkeiten unter einer sehr steilen, asymmetrischen Extremwelle (Yura-Wave). Auch die Validierung für diesen Extremfall liefert exzellente Ergebnisse.

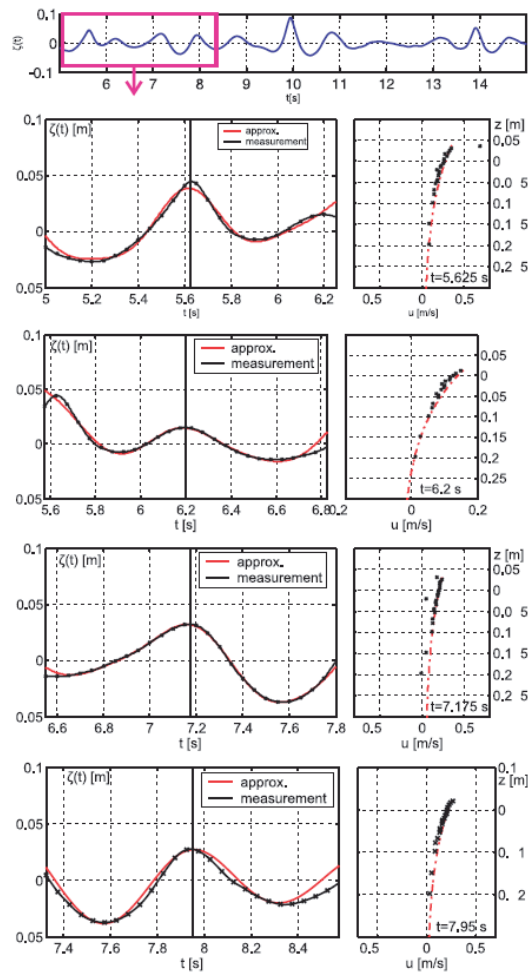


Abb. 41: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_i unter einer Monsterwelle (Yura-Wave) verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet)

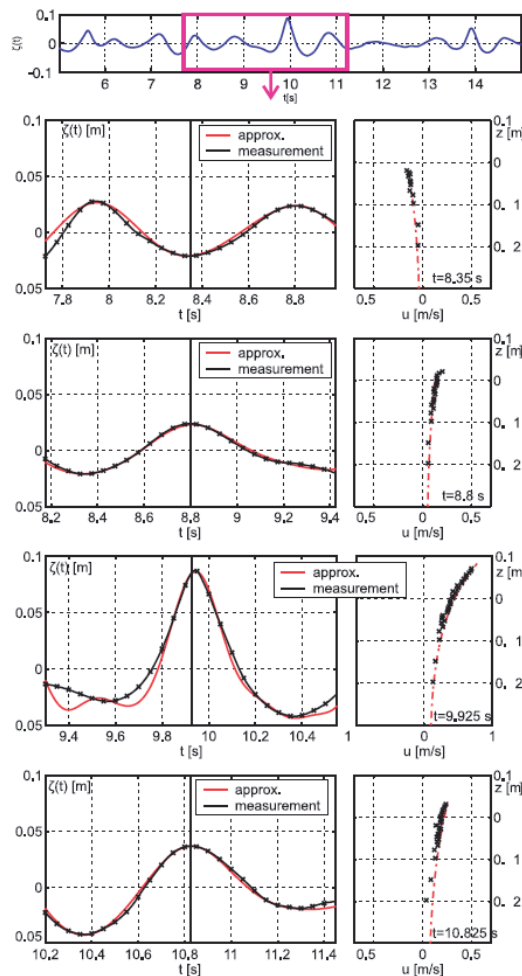


Abb. 42: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_2 unter einer Extremwelle (Yura-Wave) verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet)

Da die Approximationsmethode das gesamte Potential unterhalb des irregulären Seegangs beschreibt, liefert Sie gleichzeitig alle nötigen Informationen sowohl über das Geschwindigkeitsfeld als auch über die Druckverteilung. Durch die nichtlineare Näherung wird die Wellenkontour möglichst exakt nachgebildet. Dadurch lässt sich mit dieser Methode die Realität sehr genau abbilden.

Allerdings lassen sich mit dieser Methode bisher nur langkämmige Seegänge analysieren. Aus diesem Grund wurde ein weiteres Verfahren entwickelt mit dem sich die Druckverteilung unterhalb eines lang- oder kurzkämmigen Wellenfeldes mittels linearer Theorie schnell und zuverlässig annähern lässt. Diese modifizierte lineare Theorie wird im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben.

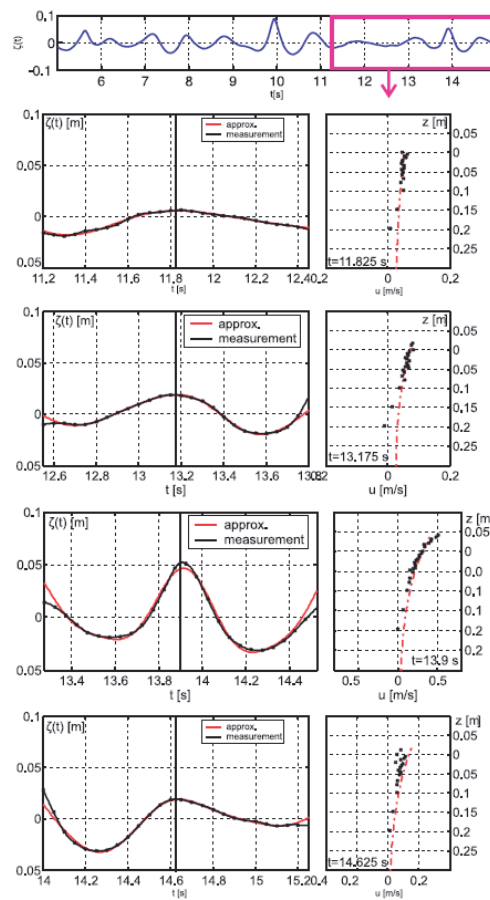


Abb. 43: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_2 unter einer Monsterwelle (Yura-Wave) verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet)

5.3.2. Adaptive Stretching

5.3.2.1. Einleitung

Die zeitliche Änderung der Druckverteilung (der dynamische Druck) wird im Bereich unterhalb des Ruhewasserspiegels durch gängige Wellentheorien, wie z.B. die AIRY-Theorie oder die STOKES-Theorien höherer Ordnung ausreichend genau approximiert. Die AIRY-Theorie beschreibt generell nur den Bereich bis zum Ruhewasserspiegel und ist nur für infinitesimal kleine Wellenhöhen definiert. Wendet man die AIRY-Theorie in ihrer ursprünglichen Form auch für die Berechnung des dynamischen Druckes im Wellenberg an, so wird dieser in erheblichem Maße überschätzt. Wellentheorien höherer Ordnung, wie z.B. STOKES-Theorie zweiter und dritter Ordnung, überschätzen die dynamischen Drücke ebenfalls.

Desweiteren wird bei keiner der genannten Theorien die Druckrandbedingung an der freien Oberfläche erfüllt, welche beinhaltet, dass der Druck an dieser Stelle dem Umgebungsdruck (Atmosphärendruck) entspricht.

5.3.2.2. Eigene Vorarbeiten

Klein, M. (2007) (liegt diesem Bericht bei) hat in seiner Diplomarbeit, die im Rahmen dieses Projekts entstand, Druckfelder in extremen irregulären Seegängen untersucht.

Zu diesem Zweck wurde der dynamische Druck eines irregulären Seegangs mittels Fourieranalyse analysiert werden, welche den Seegang als Überlagerung harmonischer Einzelwellen mit unterschiedlicher Frequenz und Phase darstellt. Abb. 44 stellt den Verlauf der Berechnung für eine Wassertiefe exemplarisch dar. Die gemessene Registrierung (Abb. 44, oben) wird als erstes mittels Fast Fourier Transformation in den Frequenzbereich überführt. Die Fourierkoeffizienten enthalten Informationen über die Amplituden (Abb. 44, zweite von oben) und die Phasen (Abb. 44, dritte von oben) jeder einzelnen harmonischen Komponente. Der dynamische Druck kann dann für jede einzelne harmonische Komponente mittels linearer Wellentheorie berechnet werden und man erhält die Druckamplitude für vordefinierte Wassertiefen z (Abb. 44, zweite von unten). Abschließend werden die Druckamplituden und die Phaseninformationen zu einem neuen Fourierkoeffizienten zusammengefügt und mittels inverser Fast Fouriertransformation wieder in den Zeitbereich zurücktransformiert (Abb. 44, unten).

In diesem Beispiel wird ein irregulärer Seegang mit den Eigenschaften $H_s = 0,044$ m und $T_p = 0,83$ s untersucht. In diesem Seegang ist eine Extremwelle mit $H_{max} = 2,14 \cdot H_s$ eingebettet. In Abb. 45 wird der Verlauf des maximalen dynamischen Druckes unter dem Extremwellenberg über die Tiefe der Messungen mit der Fourieranalyse verglichen. Dort ist zu erkennen, dass über weite Tiefenbereiche die Übereinstimmung sehr gut ist. In Oberflächennähe, $z > -0,05$ m, wächst bei der Fourieranalyse die Druckamplitude stärker. Beim Versuch ergibt sich ab dem Ruhewasserspiegel eine schnelle Abnahme der Druckamplitude. Bei der Fourieranalyse steigt ab dem Ruhewasserspiegel der Druck rapide an und ergibt ab $z > 0,005$ m unrealistische Werte. In Abb. 46 sind die zeitlichen Verläufe des dynamischen Druckes für ausgewählte Tiefenbereiche dargestellt. Die oberste Grafik zeigt die Registrierung. Dort ist die Extremwelle sehr gut zu identifizieren. In den Grafiken darunter sind die einzelnen Tiefenbereiche dargestellt, wobei sich die dargestellten Wassertiefen von oben nach unten abnehmen. Bis $z = -0,04$ m ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Theorie sehr gut. Danach zeigt sich die Schwäche der linearen Wellentheorie bei der Fourieranalyse, da auch im Wellental außerhalb der Oberfläche ein dynamischer Druck ermittelt wird. Dies ist besonders gut ab $z = -0,005$ m zu erkennen. In der zweiten Grafik von unten ist gut zu sehen, dass ab $z > 0$ m die Fourieranalyse schlechte Ergebnisse liefert. Je weiter man sich von der Ruhewasserlinie entfernt, desto größer ist die exponentielle Extrapolation aus dem Gültigkeitsbereich der linearen Theorie. Dadurch werden die höherfrequenten Wellen des Spektrums über dem Ruhewasserspiegel immer dominanter und es ergibt sich, wie bereits erwähnt, ein rapider Zuwachs des Druckes.

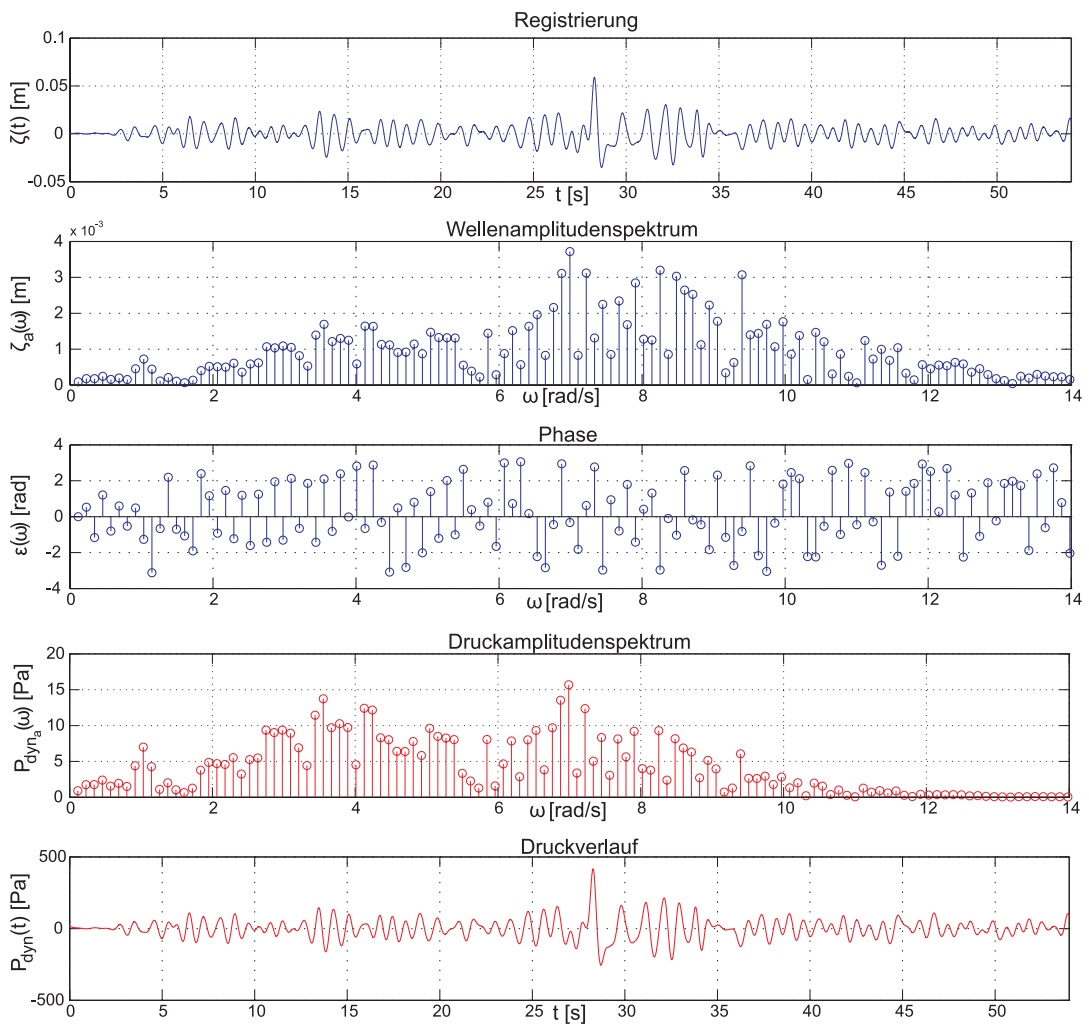


Abb. 44: Darstellung der Berechnung des dynamischen Druckes in irregulären Seegängen mittels Fourieranalyse. Hierbei handelt es sich um einen Seegang mit $H_s = 0,044$ m und $T_p = 0,83$ s und eingebetteter Extremwelle ($H_{max} = 2.14 \cdot H_s$). Der dynamische Druck wird für $z = -0.18$ m dargestellt.

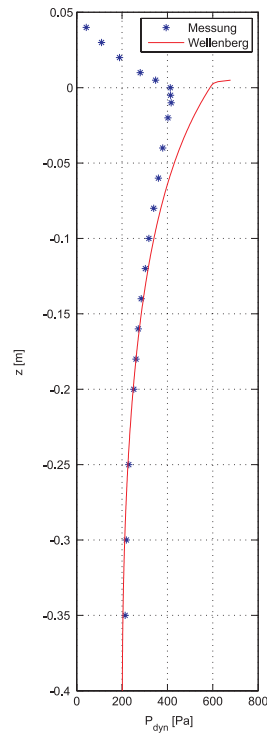


Abb. 45: Vergleich des Druckverlaufes über die Tiefe zwischen den Versuchsergebnissen und der Fourieranalyse

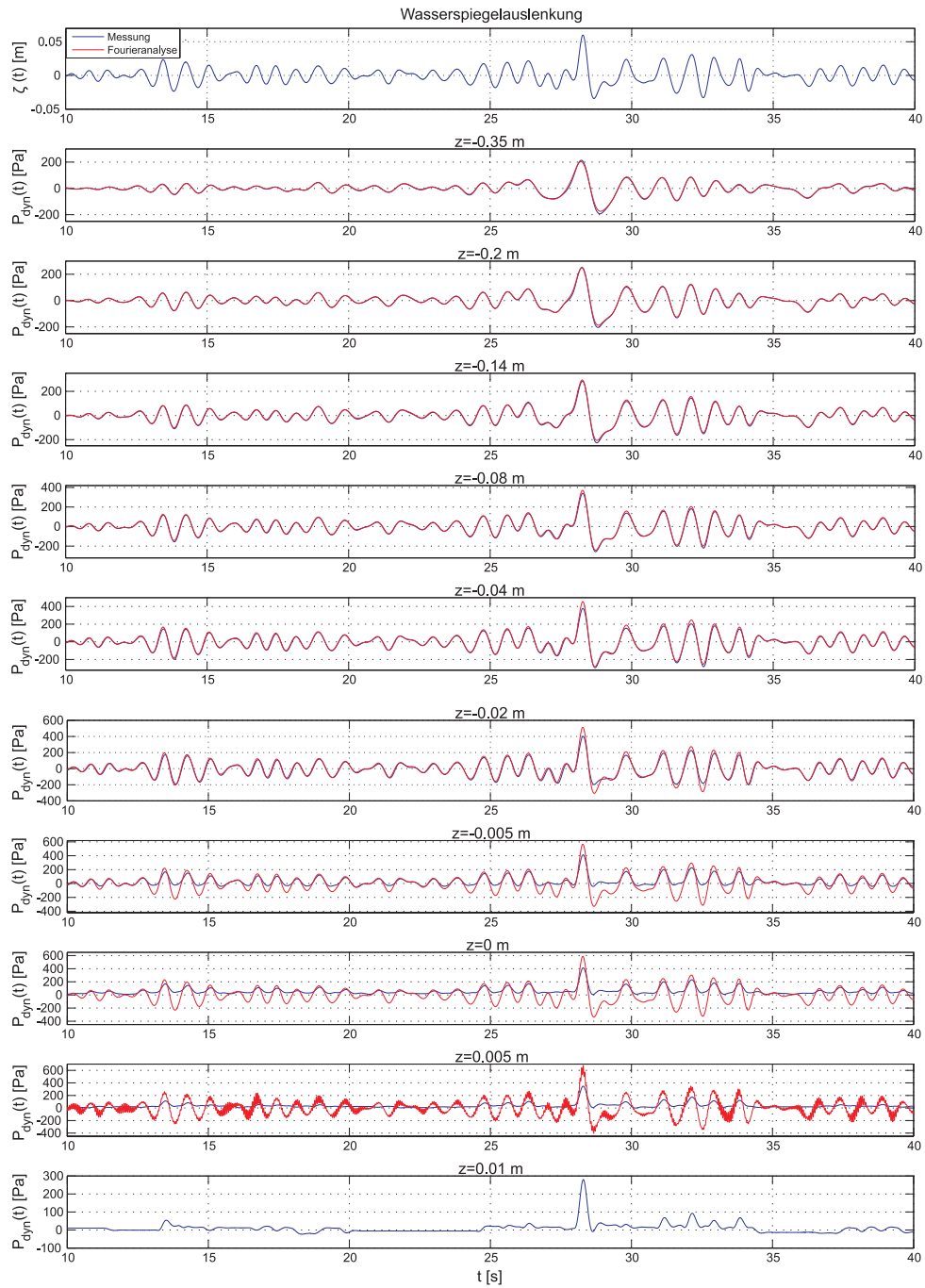


Abb. 46: Vergleich der gemessenen Werte mit der Fourieranalyse. Die obere Grafik zeigt die gemessene Wasserspiegelauslenkung. In den nachfolgenden Grafiken wird der zeitliche Verlauf des dynamischen Druckes für ausgewählte Tiefenpositionen dargestellt. Man beachte, dass die einzelnen Grafiken unterschiedlich skaliert sind!

Durch diese Arbeit wurden die Grenzen der linearen Theorie bei der Darstellung der Druckverteilung in regulären und irregulären Seegängen oberhalb des Ruhewasserspiegels sehr deutlich. Der Versuch die Druckverteilung unter einem irregulären Seegang durch Superposition der Drücke aller harmonischen Einzelkomponenten des Seegangsspektrums zu beschreiben liefert gute Ergebnisse für den Bereich unterhalb des Ruhewasserspiegels. Wendet man die lineare Wellentheorie auch oberhalb des Ruhewasserspiegels an – also außerhalb ihres eigentlichen Gültigkeitsbereichs – so ist zu beobachten, dass die Drücke oberhalb des Ruhewasserspiegels extrem überschätzt werden. Die vollständige Analyse der Druckverteilung für diesen und weitere Seegänge findet sich ausführlich in Klein, M. (2007) (liegt diesem Bericht bei).

5.3.2.3. Adaptive Stretching für reguläre Wellen

Um diesen Fehler zu beheben wurde ein adaptiver Korrekturterm zweiter Ordnung eingeführt, mit dem die Ergebnisse der Wellentheorien für die Berechnung des dynamischen Drucks im Bereich oberhalb des Ruhewasserspiegels modifiziert werden. Dieser Term sichert die Einhaltung der Druckrandbedingung an der freien Oberfläche und kann an jede gängige Wellentheorie angepasst werden. In Kombination mit einer FFT (Fast Fourier Transformation) kann das adaptive Verfahren auch auf die Berechnung der Druckverteilung in irregulären lang- und kurzkämmigen Seegängen oberhalb des Ruhewasserspiegels angewendet werden. Die resultierende Druckverteilung wird dabei mittels Superposition der Druckverteilungen aller Einzelkomponenten eines Seegangsspektrums ermittelt. Die Methode wurde erfolgreich mit Messungen validiert. Dieses Verfahren wurde erstmals in Claus et al., (2009a) (liegt dem Bericht bei) veröffentlicht und wird im folgenden skizziert.

Der totale Druck unterhalb regulärer Wellen folgt aus drei Komponenten – dem hydrostatischen Druck, dem hydrodynamischen Druck sowie dem atmosphärischen Druck. Der atmosphärische Druck soll dabei im folgenden vernachlässigt werden. Der hydrostatische Druck unter einer freien Wasseroberfläche ergibt sich dabei als

$$p_{stat} = \rho g (-z) \quad (26)$$

mit $z \leq 0$ und $z \leq \zeta(x,t)$.

Der hydrodynamische Druck beschreibt die durch Wellen verursachte Veränderung des absoluten Drucks verglichen mit Stillwasserbedingungen und ergibt sich nach linearer Theorie (AIRY) zu

$$p_{dyn}(x, z, t) = \rho g \underbrace{\zeta_a \cos \Theta}_{\text{surface elevation}} \underbrace{\frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd}}_{\text{decay term}} \quad (27)$$

Im Rahmen dieses Projekts wurden Messungen im Seegangsbecken der *TUB* durchgeführt, bei denen Seegänge (regulär und irregulär) und der sich unter dem Wellenzug ausbildende Druckverlauf (Messungen des Drucks in verschiedenen Wassertiefen) als Funktion der Zeit registriert wurden. Abb. 47 und Abb. 48 zeigen einen Vergleich zwischen gemessenen hydrodynamischen Druck und Berechnung des dynamischen Drucks wie sie sich ergibt, wenn man die lineare Theorie nicht nur unterhalb sondern auch oberhalb des Ruhewasserspiegels anwendet. Abb. 47 zeigt eine gute Übereinstimmung für das Wellental. Wie zu erwarten, werden die dynamischen Drücke oberhalb des Ruhewasserspiegels (im Wellenberg, siehe Abb. 48) überschätzt und die Oberflächenrandbedingung, welche besagt, dass der Druck an der Wasseroberfläche in den Atmosphärendruck übergehen muss, wird nicht eingehalten.

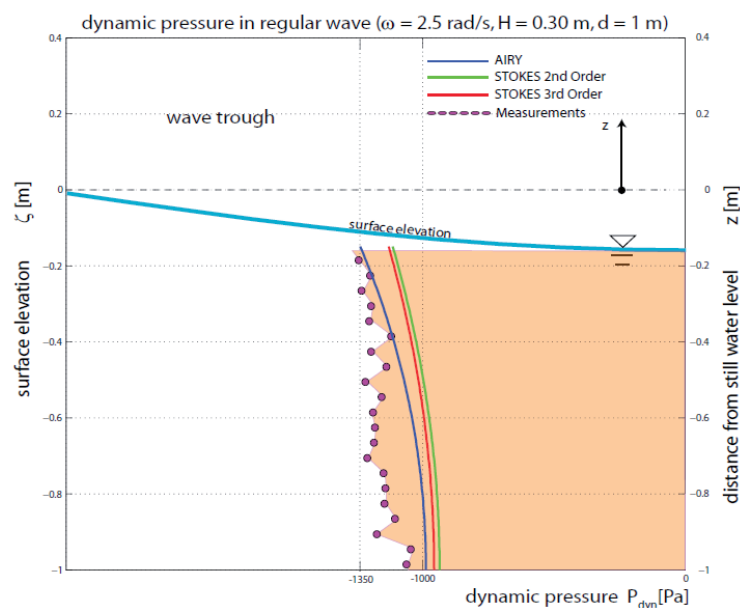


Abb. 47: hydrodynamischer Druck im Wellental (Vergleich von Messung und linearer Theorie)

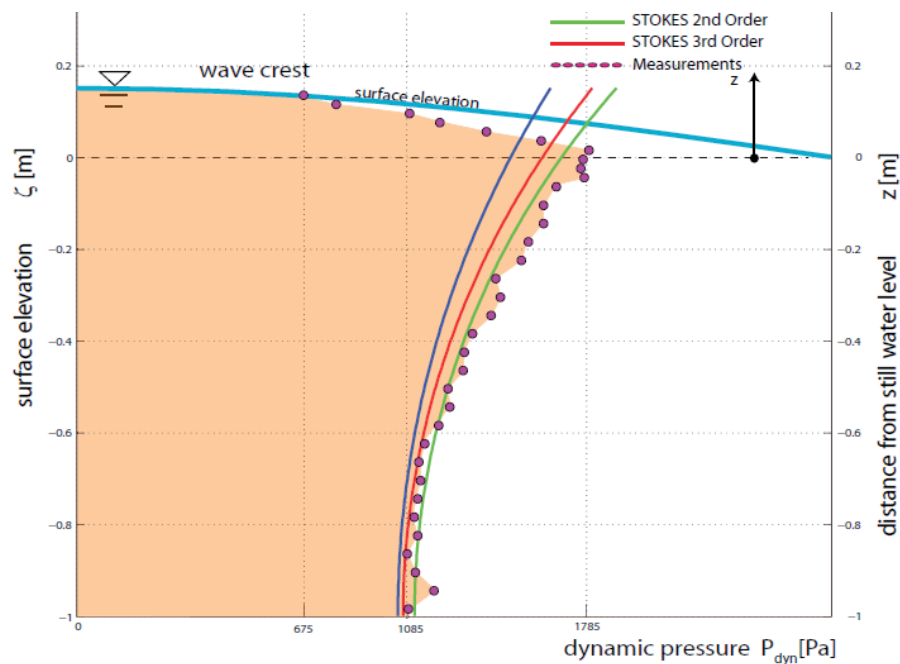


Abb. 48: hydrodynamischer Druck im Wellenberg (Vergleich von Messung und linearer Theorie)

Um den Verlauf des dynamischen Drucks mit dem neuen *Adaptive Stretching* Ansatz zu berechnen, ist eine Unterscheidung von drei Fällen notwendig (siehe Abb. 49). Für die drei Fälle (a,b und c) ergibt sich folgendes:

- **Region a:** für $z \leq 0$ und $z \leq \zeta(x,t)$ kann die Gleichung zur Berechnung des dynamischen Drucks nach linearer Theorie (vgl. Gl. (27)) ohne Änderungen angewandt werden.
- **Region b:** für $z > 0$ und $z \leq \zeta(x,t)$ wird der Abklingterm aus Gl. (27)

$$\left(\frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \right) \quad (28)$$

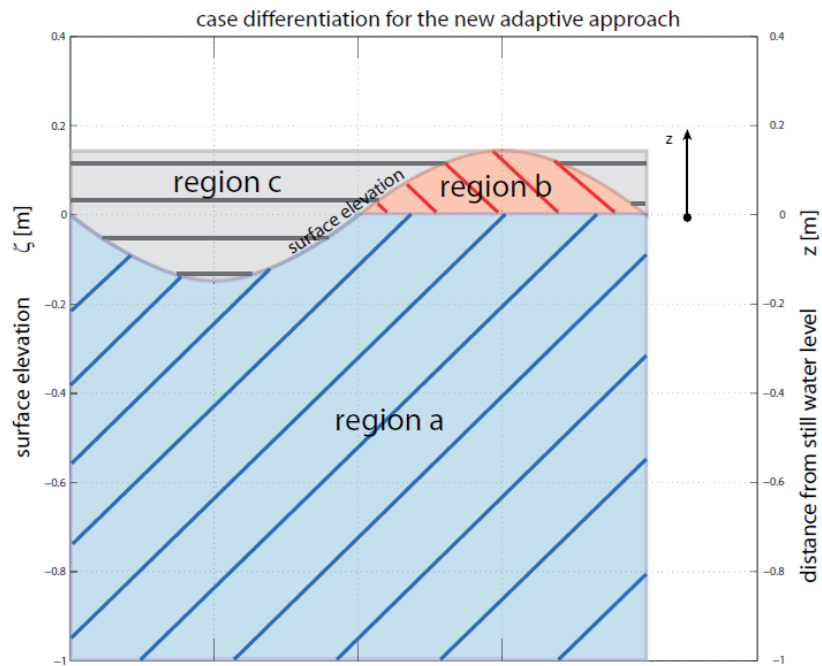


Abb. 49: Fallunterscheidung für den *Adaptive Stretching* Ansatz

ersetzt durch den neuen *Adaptive Stretching Term* (siehe Gl. (29)).

$$\left(1 - \frac{z^2}{(\zeta_a \cos \Theta)^2} \right) \tag{29}$$

Daraus ergibt sich für die Berechnung des dynamischen Drucks in diesem Bereich folgende Gleichung.

$$p_{dyn} = \overbrace{\rho g \zeta_a \cos \Theta}^{\text{surface elevation}} \underbrace{\left(1 - \frac{z^2}{(\zeta_a \cos \Theta)^2} \right)}_{\text{adaptive stretching term}} \tag{30}$$

- **Region c:** für diesen Bereich wird der dynamische Druck $p_{dyn} = 0$.

Durch den *Adaptive Stretching* Ansatz wird der Verlauf des dynamischen Drucks im Wellenberg durch einen polynomischen Ansatz 2-ten Grades korrigiert. An der freien Wasseroberfläche $z = \zeta(x,t)$ wird der *Adaptive Stretching Term* zu null, womit der dynamische

Druck ebenfalls zu $p_{dyn} = 0$ wird. Für $z \rightarrow 0$ wird der Adaptive Stretching Term zu 1 und der modifizierte dynamische Druck wird gleich dem dynamischen Druck nach linearer Theorie für $z = 0$.

Abb. 50 bis Abb. 52 zeigen die erfolgreiche Validierung der Berechnung am Beispiel verschiedener regulärer Wellen.

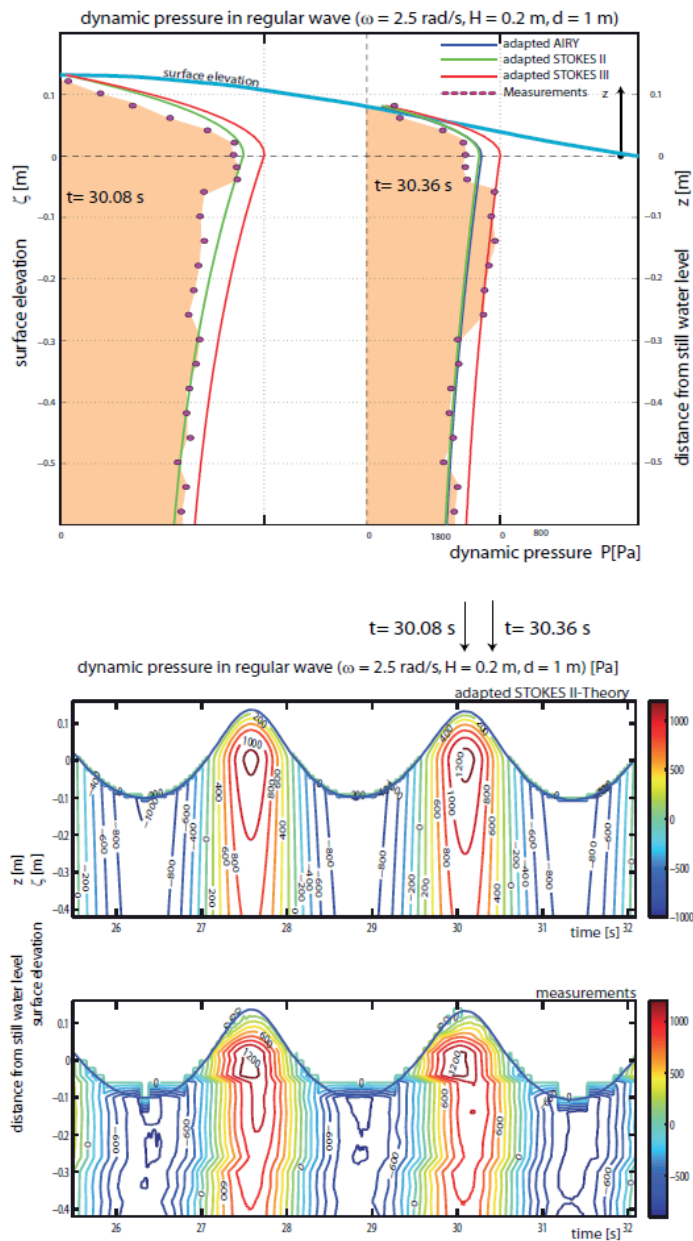


Abb. 50: dynamischer Druck unter regulärer Welle ($\omega = 2,5 \text{ rad/s}$, $H = 0,2 \text{ m}$, $d = 1 \text{ m}$) (Vergleich von Berechnung und Messung)

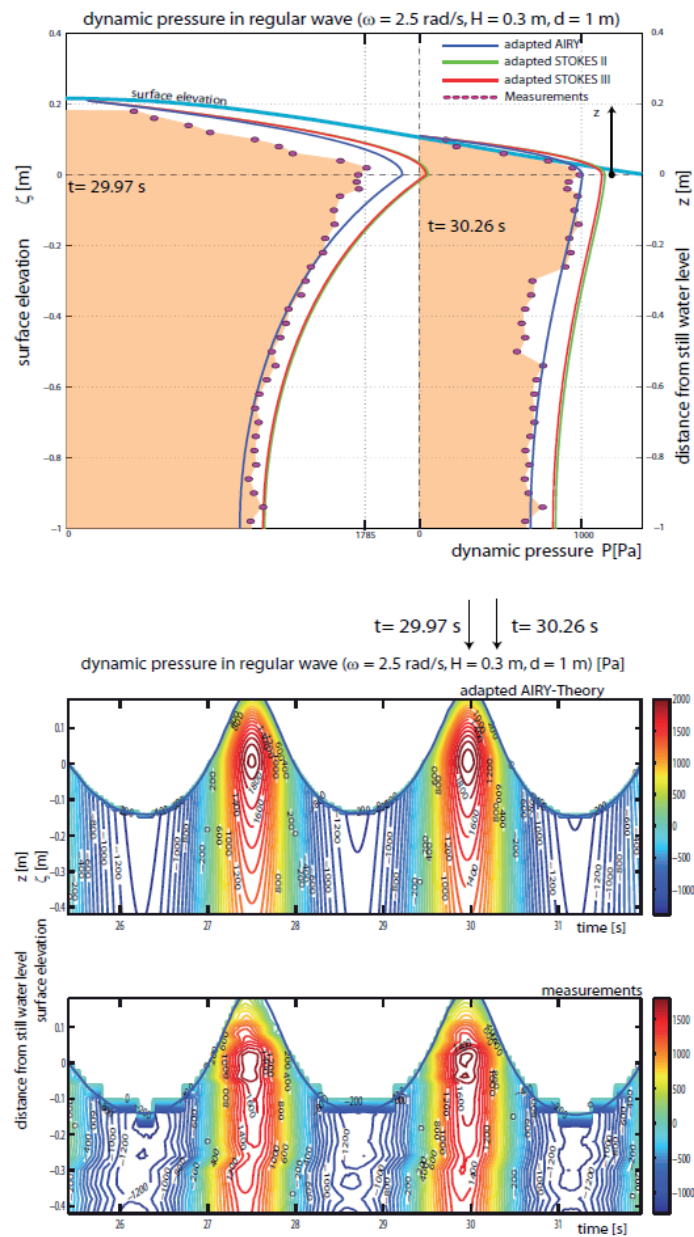


Abb. 51: dynamischer Druck unter regulärer Welle ($\omega = 2,5$ rad/s, $H = 0,3$ m, $d = 1$ m) (Vergleich von Berechnung und Messung)

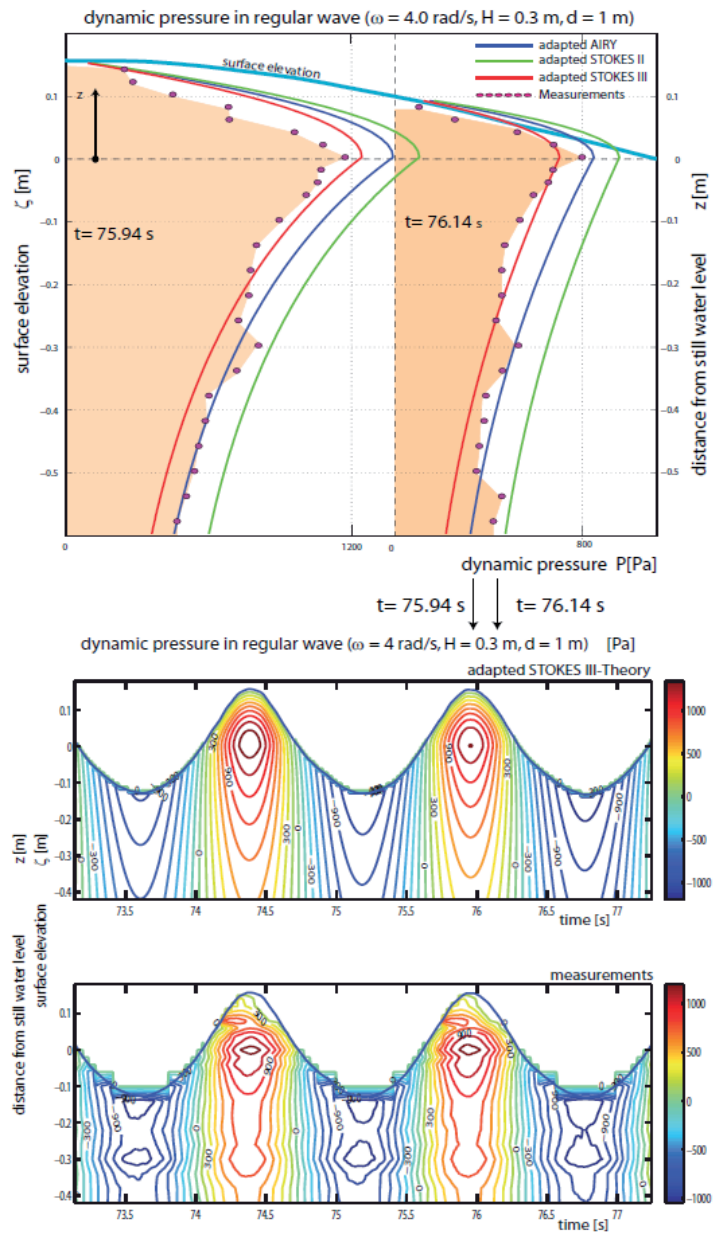


Abb. 52: dynamischer Druck unter regulärer Welle ($\omega = 4 \text{ rad/s}$, $H = 0,3 \text{ m}$, $d = 1 \text{ m}$) (Vergleich von Berechnung und Messung)

5.3.2.4. Adaptive Stretching für irreguläre, langkämmige Seegänge

Irreguläre Seegänge können in der linearen Theorie als Superposition harmonischer sinusförmiger Wellenkomponenten beschrieben werden. Da die Berechnung für reguläre Wellen erfolgreich validiert werden konnte, konnte im folgenden auch der dynamische Druck unter

einem irregulären Seegang als Superposition der dynamischen Drücke aller harmonischen Einzelkomponenten berechnet werden. Dazu musste der *Adaptive Stretching Term* lediglich leicht modifiziert werden, so dass im Nenner des Term diesmal nicht die freie Oberfläche einer einzelnen regulären Welle steht, sondern die freie Oberfläche des irregulären Seegangs als Superposition der freien Oberflächen aller harmonischen Einzelkomponenten (siehe Gl. (31)).

$$\underbrace{\left(1 - \frac{z^2}{\left(\sum_n^1 \zeta_{a,j} \cos \Theta \right)^2} \right)}_{\text{adaptive stretching term}} \quad (31)$$

daraus ergibt sich für irreguläre, langkämmige Seegänge und **Region b** folgende Gleichung.

$$p_{dyn} = \overbrace{\rho g \underbrace{\zeta_a \cos \Theta}_{\text{surface elevation}}}_{P_{dyn}(x,z=0,t)} \underbrace{\left(1 - \frac{z^2}{\left(\sum_n^1 \zeta_a \cos \Theta \right)^2} \right)}_{\text{adaptive stretching term}} \quad (32)$$

Die Validierung für langkämmige irreguläre Seegänge (siehe Abb. 53 und Abb. 54) zeigt wiederum sehr gute Übereinstimmungen zwischen modifizierter Theorie und Messungen.

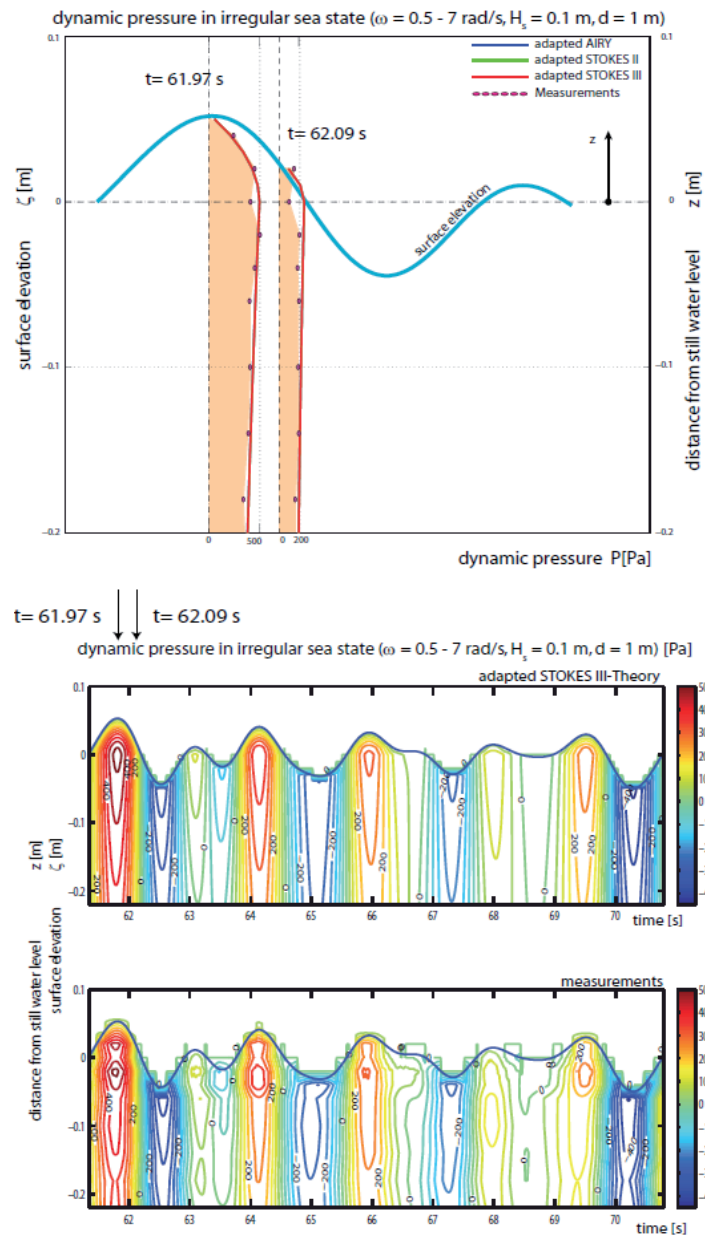


Abb. 53: dynamischer Druck unter irregulärem Seegang ($T_0 = 2 \text{ s}$, $H_s = 0,1 \text{ m}$, $d = 1 \text{ m}$) (Vergleich von Berechnung und Messung) (Acht Kurven sind teilweise deckungsgleich)

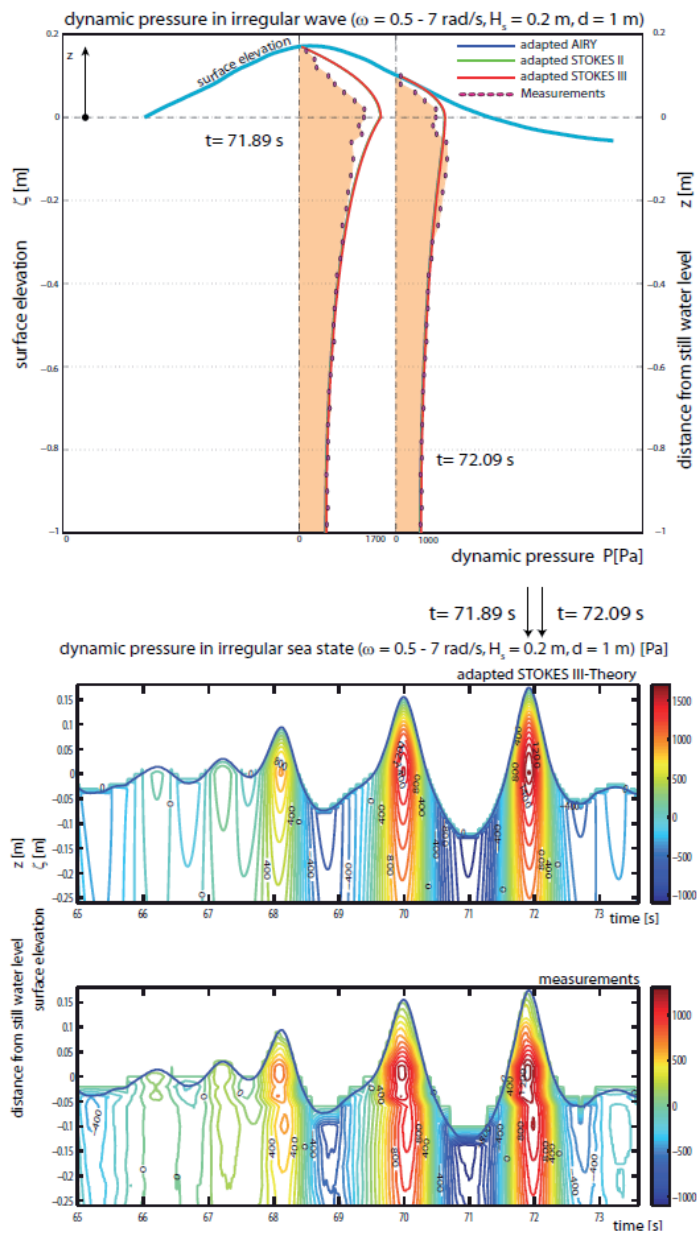


Abb. 54: dynamischer Druck unter irregulärem Seegang ($T_0 = 2 \text{ s}, H_s = 0,2 \text{ m}, d = 1 \text{ m}$) (Vergleich von Berechnung und Messung) (Achtung Kurven sind teilweise deckungsgleich)

5.3.2.5. Adaptive Stretching für irreguläre, kurzkämmige Seegänge

In Analogie zu den Modifikationen für irregulären, langkämmigen Seegang kann die Verteilung des dynamischen Drucks auch unter irregulärem, kurzkämmigem Seegang berechnet werden. Dazu müssen zusätzlich die richtungsabhängigen Phaseninformationen der Seegangskomponenten berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich für **Region b** folgendes:

$$p_{dyn}(x, y, z, t) = \rho g \underbrace{\zeta_a \cos(k_x x + k_y y + \omega t + \phi)}_{\text{surface elevation}} \underbrace{\frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd}}_{\text{decay term}} \quad (33)$$

$$\text{for: } z < 0 \quad \text{and} \quad z \leq \zeta_a \cos \Theta$$

$$p_{dyn}(x, y, z, t) = \rho g \underbrace{\zeta_a \cos(k_x x + k_y y + \omega t + \phi)}_{\text{surface elevation}} \underbrace{\left(1 - \frac{z^2}{\left(\sum_n^1 \zeta_{a,j} \cos \Theta \right)^2} \right)}_{\text{adaptive stretching term}} \quad (34)$$

$$\text{for: } z > 0 \quad \text{and} \quad z \leq \zeta_a \cos \Theta$$

Basierend auf einem in der Nordsee gemessenen multidirektionalen Seegangsspektrum wurden die resultierende Druckverteilung unterhalb der Wasseroberfläche berechnet. Durch Panelisierung der Schiffsaußenhaut (Koordinaten x, y, z sind bekannt) kann in Analogie auch der Außendruck auf die Schiffshülle berechnet werden. Es ist anzumerken, dass die Berechnung der Drücke auf die Außenhaut keine Wellen/Struktur-Interaktion (Radiations-, Diffraktionswellenfelder) berücksichtigt und deshalb keine exakte Abbildung des Drucks auf die Außenhaut darstellen kann. Trotzdem bietet dieses Tool in einer excellenten Näherung die Möglichkeit Außenhautdrücke, resultierend aus realistischen, aufgemessenen Seegangsspektren, schnell und zuverlässig zu approximieren.

Abb. 55 zeigt ein Beispiel für die Anwendung des *Adaptive Stretching Verfahrens* in irregulärem, kurzkämmigem Seegang. Dabei zeigt Abb. 55 (oben) die freie Wasseroberfläche. Abb. 55(mitte) zeigt den berechneten dynamischen Druck unterhalb des Wellenfelds. Abb. 55 (unten) zeigt die freie Oberfläche mit Schiff und berechnetem Druck auf die Schiffsaußenhaut. Abb. 56 zeigt passend dazu noch einmal die Druckverteilung auf die Außenhaut des Schiffs ohne Wellenkontour .

Die vollständige Beschreibung der Methode des *Adaptive Stretching Ansatzes* mit allen Anwendungsbeispielen findet sich ausführlich in Claus et al. (2009) sowie in Claus et al. (2009a).

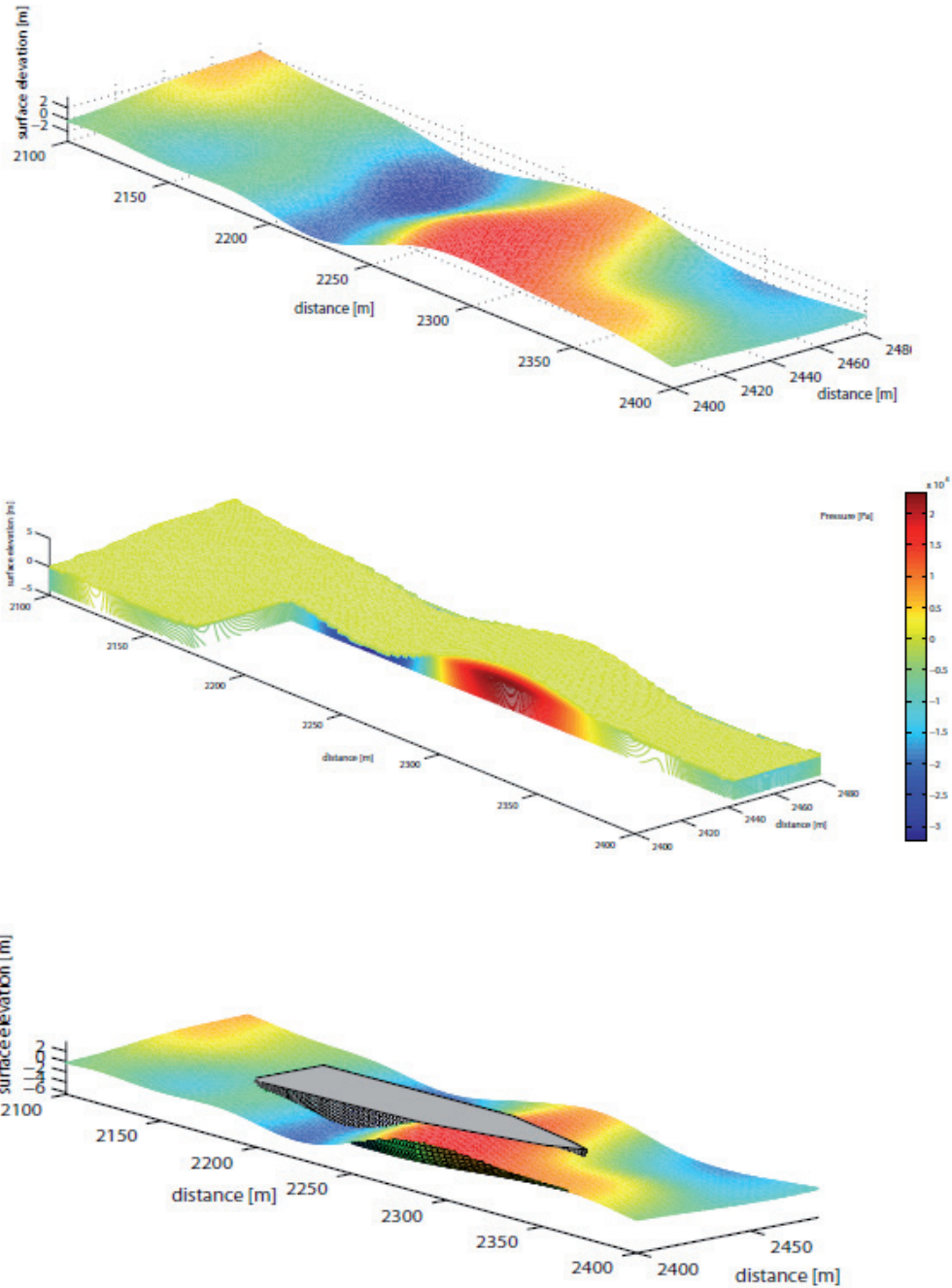


Abb. 55: Irregulärer, kurzkämmiger Seegang (oben); Verteilung des dynamischen Drucks (mitte); Seegang und Verteilung des dynamischen Drucks auf die Schiffsaußenhaut (unten)

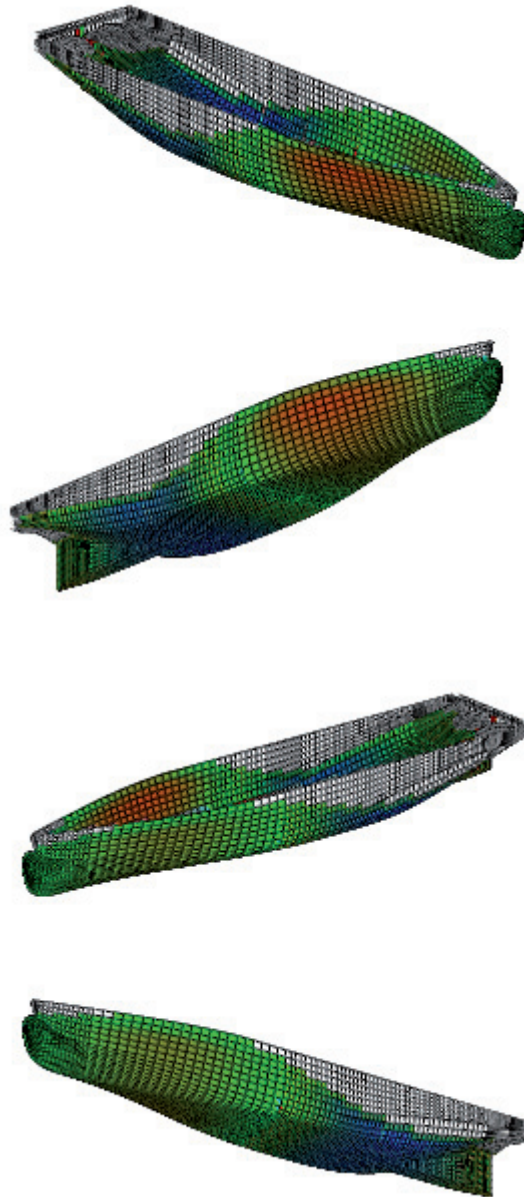


Abb. 56: Verteilung des dynamischen Drucks auf die Schiffsaußenhaut passend zum Seegang aus Abb. 55 (blau: negativer dynamischer Druck, rot: positiver dynamischer Druck)

5.3.3. Veröffentlichungen

Im Rahmen dieses Projektteils sind folgende Veröffentlichungen entstanden:

- national:
- „Herve, P. N., (2006): Wellenlasten auf ein RoRo-Schiff im Seegang. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin“
- „Klein, M. (2007): Druckfelder in extremen Seegängen. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin“
- „Stempinski, F. (2009): On Wave Kinematics in Harsh Seaway and Freak Waves. PhD-Thesis, Technische Universität Berlin“
- international:
- „Claus, G. F., Stempinski, F., Stück, R. (2008): On Modelling Kinematics of Steep Irregular Seaway and Freak Waves. In OMAE 2008 - 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal. OMAE2008-57228.“
- „Claus, G. F., Kosleck, S., Sprenger, F. und Boeck, F. (2009): Adaptive Stretching of Dynamic Pressure Distribution in Long- and Short-Crested Seas, OMAE 2009 - 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA.“

6 Verwertbarkeit und Fortschritt anderer Stellen

6.1. Verwertbarkeit

Ein Erreichen der Projektziele aus Teilprojekt 1 hat eine nachhaltige Verbesserung der Versuchstechnik (nicht nur an der *HSVA* und der *TUB*) zur Folge. Insbesondere werden in dem geschilderten Teilprojekt die Methoden zu Seegangsgenerierung und -analyse entscheidend erweitert.

Teilprojekt 2 und 3 liefern im Zusammenschluss erstmals verlässliche Großführungsdaten für die Analyse von in der Natur aufgemessenem Seegang und daraus resultierenden Druckverteilungen auf die Schiffsaußenhaut. Daraus resultierend können Druckverteilungen, so wie sie sich in natürlichem Seegang ergeben als Input für Analysen der Struktur oder des Seegangsverhaltens eines Schiffs schon in der Entwurfsphase verwendet werden.

Beides hat den Entwurf und den Bau sichererer Schiffe zur Folge. Es ergeben sich einerseits Vorteile für die *HSVA* als Versuchsanstalt – durch die Generierung maßgeschneiderter Seegänge - und andererseits für die *FSG* als Werft – durch verbesserte Entwurfsmethoden. Langfristig sind Verbesserungen der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Schiffbau-Industrie zu erwarten.

6.2. Fortschritt anderer Stellen

Bei den in Teilprojekt 1 entwickelten Methoden zur Seegangsgenerierung handelt es sich um ein einzigartige Verfahren. Fortschritte oder Arbeiten anderer Stellen sind nicht bekannt.

Die Entwicklung von Verhersagesystemen für Seegang und daraus resultierenden Strukturantworten ist ein in den letzten Jahren viel beachtetes Thema, zu dem es zahlreiche Veröffentlichungen gibt. Die Kombination von Seegangsregistrierung, -analyse, und -vorhersage im Zusammenspiel mit der Vorhersage von Bewegungen und Druckverteilungen, wie in Abschnitt 5.2 und Abschnitt 5.3 geschildert, ist in dieser Form einzigartig

7 Danksagung

Wir möchten uns herzlich bei all unseren Projektpartnern für die gute, nun mittlerweile langjährige Zusammenarbeit bedanken. Unser besonderer Dank gilt dem *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* (BMWi) sowie dem *Projektträger Jülich* (PTJ) für die Finanzierung und die Unterstützung des Projekts.

Dank auch allen administrativen, wissenschaftlichen und studentischen Mitarbeitern, welche die Bearbeitung und den Erfolg des Projekts erst möglich gemacht haben.

8 Literatur

1. Benjamin, T. B. und Feir, J. E. (1967): The disintegration of wave trains on deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 27(3):417–430.
2. Benney, D. J. (1962): Non-linear gravity wave interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, 14:577–584.
3. Bergmann, J. (1985): Gaußsche Wellenpakete — Ein Verfahren zur Analyse des Seegangsverhaltens meerestechnischer Konstruktionen. PhD thesis, Technische Universität Berlin (D 83).
4. Clauss, G. und Hennig, J. (2001a): Computergesteuerte Kenterversuche in hohen Wellengruppen. 4. Zwischenbericht zum BMBF-Vorhaben ROLL-S, Institut für Schiffs- und Meerestechnik, Fachgebiet Meerestechnik, Technische Universität Berlin.
5. Clauss, G. und Hennig, J. (2001b): Tailored Transient Wave Packet Sequences for Computer Controlled Seakeeping Tests. In *OMAE 2001 - 20th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro, Brasil. OMAE2001-1081.
6. Clauss, G. und Hennig, J. (2003): Deterministic Analysis of Extreme Roll Motions and Subsequent Evaluation of Capsizing Risk. In *STAB 2003 - 8th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Madrid, Spain.
7. Clauss, G., Hennig, J., Brink, K.-E., und Cramer, H. (2004a): A New Technique for the Experimental Investigation of Intact Stability and the Validation of Numerical Simulations. In *International Workshop on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Shanghai, China.
8. Clauss, G., Hennig, J., und Cramer, H. (2002): Evaluation of Capsizing Risk by Deterministic Analysis of Extreme Roll Motions. In *ITTC 2002 - 23rd International Towing Tank Conference*, Venice.
9. Clauss, G., Hennig, J., Cramer, H., und Krüger, S. (2003a): Development of Safer Ships by Deterministic Analysis of Extreme Roll Motions in Harsh Seas. In *OMAE 2003 - 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Cancun, Mexico. OMAE2003-317174.
10. Clauss, G. und Kühnlein, W. (1995a): A New Approach to Seakeeping Tests of Self-Propelled Models in Oblique Waves with Transient Wave Packets. In *OMAE 95 - 350*, Copenhagen.
11. Clauss, G., Steinhagen, U., und Pakozdi, C. (2001): Experimental optimization of transient waves in extreme seas.
12. Clauss, G. F., Hennig, J., Cramer, H., und Brink, K.-E. (2005): Validation of Numerical Motion Simulations by Direct Comparison with Time Series from

- Ship Model Tests in Deterministic Wave Sequences. In OMAE 2005 - 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece. OMAE2005-67123.
13. Claus, G. F., Hennig, J., und Schmittner, C. E. (2004b): Modelling Extreme Wave Sequences for the Hydrodynamic Analysis of Ships and Offshore Structures. In PRADS 2004 - 9th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Lübeck-Travemünde, Germany.
 14. Claus, G. F., Hennig, J., Schmittner, C. E. und Kühnlein, W. L. (2004c): Non-linear Calculation of Tailored Wave Trains for the Experimental Investigation of Extreme Structure Behaviour. In OMAE 2004 - 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, Canada. OMAE2004-51195.
 15. Claus, G. F., Kosleck, S., Sprenger, F. und Boeck, F. (2009): Adaptive Stretching of Dynamic Pressure Distribution in Long- and Short-Crested Seas, OMAE 2009 - 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA.
 16. Claus, G. F., Kosleck, S. und Testa, D. (2009a): CASH- Decision Support System for Computer Aided Ship Handling. In Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 2009, Hamburg, Germany.
 17. Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., Stück, R., (2007): Forecast of Critical Wave Groups from Surface Elevation Snapshots, OMAE 2007 - 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, USA.
 18. Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., Hessner, K., (2008): Forecast of Critical Situations in Short Crested Seas, OMAE 2008 - 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal.
 19. Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., (2009b): Critical Situations of Vessel Operations in Short Crested Seas – Forecast and Decision Support System – , OMAE 2009 - 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA.
 20. Claus, G. F. und Kühnlein, W. L. (1995b): Transient wave packets – an efficient technique for seakeeping tests of self-propelled models in oblique waves. In 3rd International Conference on Fast Sea Transportation, pages 1193–1204, Vol. 2, Lübeck-Travemünde, Germany.
 21. Claus, G. F. und Kühnlein, W. L. (1997): Simulation of design storm wave conditions with tailored wave groups. In Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), pages 228–237, Honolulu, Hawaii, USA.
 22. Claus, G. F., Schmittner, C. E., und Hennig, J. (2003b): Simulation of Rogue Waves and their Impact on Marine Structures. In MAXWAVE Final

Meeting, 8-10, October, Geneva, Switzerland.

23. Claus, G. F. und Steinhagen, U. (1999): Numerical simulation of nonlinear transient waves and its validation by laboratory data. In Proceedings of 9th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), volume III, pages 368–375, Brest, France.
24. Claus, G. F. und Steinhagen, U. (2000): Optimization of transient design waves in random sea. In Proceedings of 10th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), volume III, pages 229–236, Seattle, USA.
25. Claus, G. F., Stempinski, F., Stück, R. (2008): On Modelling Kinematics of Steep Irregular Seaway and Freak Waves. In OMAE 2008 - 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal. OMAE2008-57228.
26. Claus, G. F. und Pákozdi, C. (2002a): Numerische Simulation nichtlinearer transienter Wellengruppen. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben.
27. Cramer, H., Reichert, K., Hessner, K., Hennig, J., und Claus, G. F. (2004): Seakeeping Simulations and Seaway Models and Parameters Supporting Ship Design and Operation. In PRADS 2004 - 9th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Lübeck-Travemünde, Germany.
28. Davis, M. C. und Zarnick, E. E. (1964): Testing ship models in transient waves. In 5th Symposium on Naval Hydrodynamics.
29. Eisentraut, P. (2003): PostgreSQL, Das offizielle Handbuch. mitp-Verlag, Bonn.
30. Guedes Soares, C., Fonseca, N., Pascoal, R., Claus, G. F., Schmittner, C. E., und Hennig, J. (2004): Analysis of wave induced loads on a FPSO due to abnormal waves. In OMAE Specialty Conference on Integrity of Floating Production, Storage & Offloading (FPSO) Systems, Houston, Texas, USA. OMAE-FPSO04-0073.
31. Haver, S. (2000): Some Evidences of the Existence of Socalled Freak Waves. In Rogue Waves 2000, Brest, France.
32. Hennig, J., Brink, K.-E., und Kuehnlein, W. (2003): Innovative deterministic seakeeping test procedures. In STAB 2003 - 8th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Madrid, Spain.
33. Hennig, J. (2005): Generation and Analysis of Harsh Wave Environments. PhD-Thesis, Technische Universität Berlin
34. Herve, P. N., (2006): Wellenlasten auf ein RoRo-Schiff im Seegang. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin

35. Kjeldsen, Drennan, und Skafel (2000): Modeling of Velocities in Giant Waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 10(3):170–172.
36. Kjeldsen, S. P. und Myrhaug, D. (1984): Parametric modelling of joint probability density distributions for steepness and asymmetry in deep water. *Applied Ocean Research*, 6(4):207–220.
37. Klein, M. (2007): Druckfelder in extremen Seegängen. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin
38. Kühnlein, W. (1997): Seegangversuchstechnik mit transientser Systemanregung. PhD-Thesis, Technische Universität Berlin
39. Mori, N., Yasuda, T. und Nakayama, S. (2000): Statistical Properties of Freak Waves Observed in the Sea of Japan. In *Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, volume 3, pages 109–122, Seattle, USA.
40. Pierson, W. J. (1993): Oscillatory Third-Order Perturbation Solutions for Sums of Interacting Long-Crested Stokes Waves on Deep Water. *Journal of Ship Research*, 37(4):354–383
41. Schäffer, H. A. (1996): Second-order wavemaker theory for irregular waves. *Ocean Engineering*, 23(1):47–88.
42. Stansberg, C. (1995): Second-order random wave modelling in space and time, with comparison to experiments. In *Proceedings of the 14th Int./ Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, volume I-A, Copenhagen.
43. Steinhagen, U. (2001): Synthesizing Nonlinear Transient Gravity Waves in Random Seas. PhD-Thesis, Technische Universität Berlin
44. Stempinski, F. (2009): On Wave Kinematics in Harsh Seaway and Freak Waves. PhD-Thesis, Technische Universität Berlin
45. Testa, D. (2006): Vorhersage kritischer Wellengruppen aus Seegangsregistrierungen im Ortsbereich. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin
46. Takezawa, S. und Hirayama, T. (1976): Advanced experimental techniques for testing ship models in transient water waves. Part II: The controlled transient water waves for using in ship motion tests. In Bishop, R., Parkinson, A., and Price, W., editors, *Proceedings of the 11th Symposium on Naval Hydrodynamics: Unsteady Hydrodynamics of Marine Vehicles*, pages 37–54.
47. Takezawa, S. und Jingu, N. (1974): Testing ship models on longitudinal ship motions by transient response method (part 5 - side wall effect). (J) SNA, 136. Wu, G. and Eatock-Taylor, R. (1995). Time stepping solutions of two-dimensional nonlinear wave radiation problem. *Ocean Engineering*, 22(8):785–798.

48. Wu, G. und Eatock-Taylor, R. (1995): Time stepping solutions of a two-dimensional non-linear wave radiation problem. *Ocean Engineering*, 22(8):785-798.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ursprünglicher Balkenplan für den Projektablauf.....	16
Abb. 2: Balkenplan mit Berücksichtigung aller Änderungen im Projektablauf.....	17
Abb. 3: Wellenzug am Ort des Wellenblatts $x = 0.00$ m (oben) sowie die dazugehörigen Steuersignale der Gesamtklappe (Mitte) und der Oberklappe (unten).....	24
Abb. 4: Vergleich des mittels linearer Theorie vom Ort des ersten Pegels ($x = 3.71$ m) zum Zielpunkt ($x = 130.22$ m) transformierten Wellenzugs (rot) mit der im Kanal gemessenen Registrierung (blau).....	24
Abb. 5: Vergleich des mittels ‚WaveTUB‘ vom Wellenblatt zum Zielpunkt ($x = 130,22$ m) transformierten Wellenzugs (rot) mit der im Kanal gemessenen Registrierung (blau).....	25
Abb. 6: ‚Presim_data_analyzer‘.....	27
Abb. 7: ‚presim_target_wave‘.....	28
Abb. 8: ‚Cutoff‘.....	31
Abb. 9: ‚ReadXPos‘.....	32
Abb. 10: ‚rolls-resimulation‘.....	33
Abb. 11: ‚new_spectral_values‘.....	34
Abb. 12: simuliertes Wellenblatt.....	36
Abb. 13: FEM-Gitter mit Potentiallinien und Geschwindigkeitsvektoren.....	37
Abb. 14: Pegelregistrierungen an 10 verschiedenen Positionen im simulierten Kanal.....	37
Abb. 15: Potential (oben) und Geschwindigkeitsverteilung (unten).....	38
Abb. 16: ‚2D-Wave Forecast‘ – Superpositions-Methode.....	40
Abb. 17: Erzeugen von Snapshots aus einzelnen Pegelregistrierungen.....	41

Abb. 18: Versuchsaufbau.....	42
Abb. 19: Vorhersage von Begegnungswellenzügen an einer fixen Position unter Berücksichtigung dreier verschiedenen „Radarreichweiten“ (rot: Messung, blau: Berechnung).....	42
Abb. 20: Multidirektionals Spektrum in Tabellenform.....	43
Abb. 21: Methoden zum ‚Wave Forecast‘: ‚2-D Wave Forecast‘ (linke Seite), ‚3-D Wave Forecast‘ (rechte Seite).....	44
Abb. 22: Wellenkomponenten und ihr Einfallswinkel in Abhängigkeit der Defintion als „going to“ oder „coming from“ Spektrum.....	44
Abb. 23: Vergleich der mit der ‚3D-Wave Forecast‘ Methode vorausberechneten Wellenausbreitung mit Radarmessungen zu drei verschiedenen Zeitpunkten.....	45
Abb. 24: Zuordnung der Komponenten des Seegangsspektrums in die komplexe Matrix aufgespannt über (k_x, k_y)	47
Abb. 25: Flußdiagramm der ‚2D-IFFT Methode“.....	48
Abb. 26: in Sektoren unterteiltes schiffsfestes Koordinatensystem mit Anzahl der durch den jeweiligen Sektor auf das Schiff zulaufenden Wellenkomponenten.....	49
Abb. 27: In Sektoren unterteiltes globales Koordinatensystem (links); in Sektoren unterteiltes schiffsfestes Koordinatensystem (mitte), sektorenweise berechnete Begegnungswellenzüge.....	50
Abb. 28: Fourier-, Amplituden und Energiedichtespektrum des Begegnungswellenzugs in Abhängigkeit der Fahrtgeschwindigkeit.....	51
Abb. 29: Beispiel für die Berechnung der Schiffsbewegung für einen Freiheitsgrad (von oben nach unten: Seegang im Zeitbereich, Fourierspektrum des Seegangs (Amplituden- und Phasenspektrum), Übertragungsfunktion für die Stampfbewegung (Amplituden- und Phasenspektrum), Antwortspektrum der Bewegung (Amplituden- und Phasenspektrum), Antwort (Stampfbewegung) im Zeitbereich).....	51
Abb. 30: translatorische RAOs in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Begegnungswinkel 180° (head seas) (blau: $v = 0$ kn ohne viskose Rolldämpfung, rot: $v = 14$ kn ohne viskose Rolldämpfung, grün: $v = 14$ kn mit viskoser Rolldämpfung).....	53

Abb. 31: rotatorische RAOs in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit für Begegnungswinkel 180° (head seas) (blau: $v = 0$ kn ohne viskose Rolldämpfung, rot: $v = 14$ kn ohne viskose Rolldämpfung, grün: $v = 14$ kn mit viskoser Rolldämpfung).....	54
Abb. 32: Resultierende Stampfbewegung in Abhängigkeit der Fahrtgeschwindigkeit (orange: $v = 0$ kn, blau: $v = 5$ kn, grün: $v = 10$ kn).....	55
Abb. 33: Sektorenweise Berechnung der Schiffsbewegungen (im Frequenz- und Zeitbereich). Die Gesamtantwort des Systems für jeden Freiheitsgrad ergibt sich durch Superposition der Sektorenweise berechneten Antworten.....	56
Abb. 34: Beispiel einer Seegangsvorhersage im Nahbereich des Schiffs für einen Zeitraum von 180 s.....	57
Abb. 35: Begegnungswellenzug am Ort des Schiffs und resultierende Tauch-, Roll- und Stampfbewegungen bei einer Fahrt mit 14 kn für den in Abb. 34 dargestellten Fall.	58
Abb. 36: Änderung der Begegnungswellenzüge und der resultierenden Bewegungen bei sich ändernder Fahrtgeschwindigkeit (oben: 11 kn, mitte: 14 kn, unten: 17 kn).	59
Abb. 37: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet).....	63
Abb. 38: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_2 unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet).....	64
Abb. 39: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_3 unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet).....	65
Abb. 40: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_4 unter einem sich fokussierenden Wellenpaket verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet).....	66
Abb. 41: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_1 unter einer Monsterwelle (Yura-Wave) verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet).....	67
Abb. 42: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_2 unter einer Extremwelle (Yura-Wave) verglichen mit Messergebnissen (die ap-	

proximierte Region ist farblich gekennzeichnet).....	68
Abb. 43: Stokes-Approximation der horizontalen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_2 unter einer Monsterwelle (Yura-Wave) verglichen mit Messergebnissen (die approximierte Region ist farblich gekennzeichnet).....	69
Abb. 44: Darstellung der Berechnung des dynamischen Druckes in irregulären Seegängen mittels Fourieranalyse. Hierbei handelt es sich um einen Seegang mit $H_s = 0,044$ m und $T_p = 0,83$ s und eingebetteter Extremwelle ($H_{max} = 2.14 \cdot H_s$). Der dynamische Druck wird für $z = -0.18$ m dargestellt.....	71
Abb. 45: Vergleich des Druckverlaufes über die Tiefe zwischen den Versuchsergebnissen und der Fourieranalyse.....	72
Abb. 46: Vergleich der gemessenen Werte mit der Fourieranalyse. Die obere Grafik zeigt die gemessene Wasserspiegelauslenkung. In den nachfolgenden Grafiken wird der zeitliche Verlauf des dynamischen Druckes für ausgewählte Tiefenpositionen dargestellt. Man beachte, dass die einzelnen Grafiken unterschiedlich skaliert sind!.....	73
Abb. 47: hydrodynamischer Druck im Wellental (Vergleich von Messung und linearer Theorie).....	75
Abb. 48: hydrodynamischer Druck im Wellenberg (Vergleich von Messung und linearer Theorie).....	76
Abb. 49: Fallunterscheidung für den <i>Adaptive Stretching</i> Ansatz.....	77
Abb. 50: dynamischer Druck unter regulärer Welle ($\omega = 2,5$ rad/s, $H = 0,2$ m, $d = 1$ m) (Vergleich von Berechnung und Messung).....	78
Abb. 51: dynamischer Druck unter regulärer Welle ($\omega = 2,5$ rad/s, $H = 0,3$ m, $d = 1$ m) (Vergleich von Berechnung und Messung).....	79
Abb. 52: dynamischer Druck unter regulärer Welle ($\omega = 4$ rad/s, $H = 0,3$ m, $d = 1$ m) (Vergleich von Berechnung und Messung).....	80
Abb. 53: dynamischer Druck unter irregulärem Seegang ($T_0 = 2$ s, $H_s = 0,1$ m, $d = 1$ m) (Vergleich von Berechnung und Messung) (Achtung Kurven sind teilweise deckungsgleich).....	82
Abb. 54: dynamischer Druck unter irregulärem Seegang ($T_0 = 2$ s, $H_s = 0,2$ m, $d = 1$ m) (Vergleich von Berechnung und Messung) (Achtung Kurven sind teilwei-	

se deckungsgleich).....	83
Abb. 55: Irregulärer, kurzkämmiger Seegang (oben); Verteilung des dynamischen Drucks (mitte); Seegang und Verteilung des dynamischen Drucks auf die Schiffsaußenhaut (unten).....	85
Abb. 56: Verteilung des dynamischen Drucks auf die Schiffsaußenhaut passend zum Seegang aus Abb. 55 (blau: negativer dynamischer Druck, rot: positiver dynamischer Druck).....	86
Abb. 57: Seegangsversuche vom Juni 2007 – DFDS-Einschrauber („head seas“ und „following seas“).....	104
Abb. 58: Seegangsversuche vom Oktober 2007 – DFDS-Einschrauber („beam seas“, quertreibendes Schiff).....	105
Abb. 59: Seegangsversuche vom März 2008 – „Norröna“ („head seas“ und „following seas“).....	106
Abb. 60: Seegangsversuche vom Mai 2008 – „Norröna“ („beam seas“, quertreibendes Schiff).....	107

Anhang A

Übersicht über durchgeführte Versuche

Auf den nachfolgenden Seiten findet sich eine komplette Übersicht über alle während des Projekts durchgeführten Seegangversuche.

S303-Nr.	Video-Nr.	PreSimulation	ReSimulation	λ , [L]	Seeg. [cm]	T _{sp} [s]	T _p [s]	ω [rad/s]	β [°]	μ [deg]	Druck [kPa]	V _{well} [cm]	Roll Amplitude	Roll Periode	Bemerkung	Datum
Tankeinführung, Bezugspunkt Modell bis Mitte GSW = 23,4 s																
1															Ausgangs-GM = 37,4 mm	
2	1	x				10,00	11,85	3,00	180						Nullmessung	
3	2	x	x			10,00	11,85	3,00	180		27,88				Gute Fahrt	
4	3	x	x			10,00	11,85	3,00	180		45,31	21,54				
5	4	x	x			10,00	11,85	5,00	180		66,22	11,86				
6	5	x	x			10,00	11,85	5,00	180		223,04	15,87			Nullmessung	16.07.2007
7															Rollperiode	
8																
9	6	x	x			10,00	11,85	5,00	180		483,51	20,18				
10	7	x	x			10,00	11,85	8,00	180		60,16	3,40			Kaum noch manövrierfähig => Handsteuerung / Druckmessung nicht verwertbar	
11	8	x	x			10,00	11,85	8,00	180		236,98	3,63	47°-42°		Große Rollbewegungen erreicht / in hohen Wellen stehen geblieben und gerollt / schöne Fahrt	
12	9	x	x			10,00	11,85	8,00	180		575,51	8,8 - 14,0			Anfahrzeit nicht angepasst => zu früh gestartet	
13	10	x	x			10,00	11,85	8,00	180		453,05	6,2 - 13,9			siehe vorherige Fahrt	
14	11	x	x			10,00	11,85	8,00	180		355,47	12,01			bis dato wie erwartet die größten Drücke	
15	12	x	x			10,00	11,85	8,00	180		662,15	16,43				
16	13	x	x			12,12m	10,00	11,85	12,00	180	679,58	14,73			Wiederholung der vorherigen Fahrt / Schöne Fahrt	
17	14	x	x			12,12m	10,00	11,85	12,00	180	766,70	14,73				
18	15	x	x			12,12m	10,00	11,85	12,00	180	731,85	9,75			Keine MGC-Messung => Abbruch / teilweise große Rollwinkel	
19	16													Große Rollwinkel großer Geschwindigkeitsverlust beim Enttauchen dann Rollen		
20	17	x	x			12,12m	10,00	11,85	12,00	180	453,05	3,51				
21	18	x	x			8,00	9,48	5,00	180		87,13	21,08				
22	19	x	x			5,8m	8,00	9,48	8,00	180	592,45	19,16				
23	20	x	x			5,8m	8,00	9,48	8,00	180	383,35	14,73			Treffen die Wellenfront etwas zu spät, obwohl ähnliche Einstellung wie Mo3 Wissen nicht genau, ob wirf. Zerstoß verloren haben??	17.07.2007
24	21	x	x			5,65m	8,00	9,48	6,50	180	692,45	19,61			Wellenfront wieder etwas zu spät getroffen, Modell zu spät	
25	22	x	x			5,65m	8,00	9,48	6,50	180	209,10	15,87				
26	23	x	x			6,11m	13,00	15,41	11,00	180	662,15	18,14				
27	24	x	x			6,8m	13,00	15,41	8,00	180	346,50	19,27				
28	25	x	x			6,11m	13,00	15,41	11,00	180	226,53	12,81				
29	26	x	x			6,11m	13,00	15,41	11,00	180	104,55	5,67	40°-55°		Bei 8 m GSW gestartet. Große Rollwinkel. Heck klatscht stark auf die Wellen.	
30	27	x	x			12,12m	10,00	11,85	8,00	170	627,30	17,00			Modell leider bei 1. Wende verloren. Wendebrand zu nah an Tankwand. P1 = 975 kPa.	
31	28	x	x			12,12m	10,00	11,85	8,00	170	801,55	17,46			Wiederholung mit mehr Tankwandabstand (4m) bei Wende. Schöne Fahrt.	
32	29	x	x			5,65m	8,00	9,48	6,50	170	536,69	19,72				
33	30													Drücke gemessen, aber nicht im Protokoll aufgenommen		
34	31													Drehzahl nicht konstant		
35	32													Schon in Gruppe hoher Wellen gefahren		
36	33															
37	34															

Abb. 57: Seegangsversuche vom Juni 2007 – DFDS-Einschrauber („head seas“ und „following seas“)

Stoß-Nr.	Video-Nr.	PreSimulation	ReSimulation	Seep Name	Seep	Tadepg [s]	Tp [s]	Cvise [m]	Vmax [Hz]	Qmax [Hz]	Roll Max Amplitude [m/s]	Vmax [m/s]	Platow [deg]	Ymax [s]	Druck+ Sonded23 [kPa]	Druck- Sonded23 [kPa]	Druck+ Sonded30 [kPa]	Druck- Sonded30 [kPa]	Bemerkung	Datum
53																			Ausgangs-GM = 1,27m Rolleigenperiode	29.10.2007
54															0	0	0	0	NULL	
55															0	0	0	0	NULL	
56	1								20,00	1,0	0,146				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
57	3								30,00	2,0	0,200				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
58	4								40,00	2,9	0,260				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
59	5								50,00	4,6	0,290				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
60	7								60,00	6,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
61	8								70,00	7,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
62	9								80,00	8,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
63	10								90,00	9,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
64	11								100,00	10,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
65	12								110,00	11,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
66	13								120,00	12,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
67	14								130,00	13,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
68	15								140,00	14,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
69									150,00	15,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
70									160,00	16,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
71									170,00	17,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
72	16								180,00	18,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
73	17								190,00	19,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
74	19								200,00	20,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
75	20								210,00	21,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
76	21								220,00	22,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
77	22								230,00	23,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
78	23								240,00	24,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
79									250,00	25,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
80	24								260,00	26,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
81	25								270,00	27,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
82	26								280,00	28,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
83	27								290,00	29,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
84	28								300,00	30,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
85	29								310,00	31,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
86	30								320,00	32,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
87	31								330,00	33,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
88	32								340,00	34,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
89	33								350,00	35,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
90	34								360,00	36,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
91									370,00	37,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
92									380,00	38,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
93									390,00	39,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
94									400,00	40,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
95									410,00	41,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
96									420,00	42,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
97									430,00	43,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
98									440,00	44,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
99									450,00	45,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	
100									460,00	46,0	0,300				0	0	0	0	Modellposition wurde korrigiert	

Abb. 58: Seegangsversuche vom Oktober 2007 – DFDS-Einschrauber („beam seas“, quertreibendes Schiff)

S303-Nr.	Video-Nr.	PreSimulation	ReSimulation	Landfall	Seeg. Name	Toeding [s]	t_p [s]	$\Delta W / \Delta W_{40}$ [m]	μ [deg]	Wasser [m/s]	Vibrat. [m]	Pressure [bar]	Bemerkung	Datum
Tankfläche: Bezugsmaß Modell bei Mitte GSW = $13,9 \text{ s}$ $\omega = 43,7\%$ $GM = 4,316 \text{ m}$ Rollperiode (LF1) = $12,2 \text{ s}$ $\omega_r = 40,7\%$ $GM = 4,438 \text{ m}$														
5													Abgabe: GM = 20,7 mm => 0,48m	14.02.2008
6													Nulmessung im Trockenen	
7													Nulmessung im Wasser	
8													1. Fahrt in GW / Prog. Und Drehzahl erfahren (Modell driften)	
9													2. Fahrt in GW / Prog. Und Drehzahl erfahren (Modell driften)	
10													Drehzahl-Geschwindigkeits-Kurve. Tankkoordinatensystem um -0,5° gedreht, um Modell drift zu korrigieren / Modell erreicht max. ca. 18 km im GW	
11													Drehzahl-Geschwindigkeits-Kurve	
12													Zyk. Zuck. Einstellung PID-Regler	
13													Zyk. Zuck. Einstellung PID-Regler	
14													Nulmessung. Separate Nul für Bewehrungen und Druckenden genommen, weil MCC-Trigger bei Standardmessung nicht auslöst.	
15	1	x	x		LF2 Head_1	8,40	10,06	4,80	165	1,460	15,76	0,03	Rollausgleichswunsch LF2	
16	2	x	x		LF2 Head_1	8,40	10,06	4,80	160	1,500	15,97	0,10		
17	3	x	x		LF2 Head_1	8,40	10,06	6,72	180	1,350	14,37	0,10		
18	4	x	x		LF2 Head_1	8,40	10,06	8,00	180	1,300	13,84	0,09		
19	5	x	x		LF2 Head_2	11,70	14,02	5,00	180	1,820	16,18	0,00		
20	6	x	x		LF2 Head_2	11,70	14,02	7,00	180	1,430	15,23	0,01		
21	7	x	x		LF2 Head_2	11,70	14,02	10,00	180	1,240	13,20	0,02		
22	8	x	x		LF2 Head_2	11,70	14,02	13,00	180	1,100	11,71	0,09	Am Boden (A) 1045 kPa. Heiliges Bodenlamina	
23	9	x	x		LF2 Head_3	13,00	15,57	8,00	180	1,460	15,54	0,00	kaum was los	
24	10	x	x		LF2 Head_3	13,00	15,57	12,00	180	1,300	13,84	0,02		
25	11				NVAR2	9,52	11,40	4,00	170	1,300	12,84	0,00		
26	12	x	x		LF2	8,40	10,06	8,00	170	1,150	12,32	0,00		
27	13	x	x		LF2	8,40	10,06	8,00	170	1,411	15,03	0,07	Drehzahl hat gesponnen	
28	14	x	x		LF2	8,40	10,06	8,00	160	1,245	13,26	0,18	Schwenktest	
29	15	x	x		LF2	11,70	14,02	13,00	165	1,128	12,07	0,06	Wandstand auf 5m erhöht	
30													Umräumen auf LF1	
31													Nulmessung	
32													Rollausgleichswunsch LF2; Toh = 2,365s	
33	16	x	x		LF1 Head_1	8,40	10,06	6,72	180	1,330	14,16	0,14	Rollausgleichswunsch LF2 (mit größerem Rohrwinkel Toh = 2,376s)	
34	17	x	x		LF1 Head_1	8,40	10,06	8,00	180	1,260	13,72	0,09	Keine Druckmessung	
35	18	x	x		LF1 Head_1	8,40	10,06	8,00	180	1,240	13,20	0,08		
36	19	x	x		LF1 Tub. Head1	6,68	8,00	6,00	180	1,940	16,40	0,09	Nur sehr geringe Drücke	
37								13,482 m					Kyborahmen umgedreht, neues Zerleg gemacht.	15.02.2008
38	20	x	x		LF1 Fol 1	11,32	13,41	5,00	0	0,740	7,88	0,00	Nulmessung	
39	21	x	x		LF1 Fol 1	11,32	13,41	8,00	0	0,750	7,99	0,00	Keine Druckpunkte bei Sensor 5 und 43 sichtbar.	
40	22	x	x		LF1 Fol 1	11,32	13,41	13,00	0	0,770	8,20	0,06	p43 = 58 kPa; p5 eher ein statischer Druck, statt dynamischer Schlag.	
41	23	x	x		LF1 Fol 3	10,00	11,65	5,00	0	0,850	5,86	0,00	p44 = 28 kPa; aber eher ein statischer Druck, als dynamischer Schlag.	
42	24	x	x		LF1 Fol 3a	10,00	11,65	9,00	0	0,850	6,18	0,01	p43 = 74 kPa; p5 eher ein statischer Druck, statt dynamischer Schlag. 2x Störungen (erhöhte Drehzahl) auf der Propellerdrehzahl.	
43	25	x	x		LF1 TUB091	8,44	10,00	10,50	0	0,830	6,71	0,0056	p44 = 86 kPa; p5 eher ein statischer Druck, statt dynamischer Schlag. 1x Störungen (erhöhte Drehzahl) auf der Propellerdrehzahl.	
44	26	x	x		LF1 TUB091	8,44	10,00	8,00	0	0,860	6,39	0,003	p44 = 77 kPa; p5 eher ein statischer Druck, statt dynamischer Schlag.	
45	27	x	x		LF1 TUB091	8,44	10,00	8,00	0	0,840	6,78	0,00	p44 = 74 kPa; p5 eher ein statischer Druck, statt dynamischer Schlag.	
46	28	x	x		LF1 TUB091	8,44	10,00	8,00	10	0,980	6,18	0,02	p43 = 52 kPa	
47								12,872 m					Nulmessung	
48	29	x	x		LF1 Head_1	8,40	10,06	8,00	180	0,440	4,68	0,04	Nulmessung	
49	30	x	x		LF1 Head_1	8,40	10,06	8,00	180	1,000	17,03	0,07	Untersuchung des Einflusses verschiedener Geschwindigkeiten	
50	31	x	x		LF1 Head_1	8,40	10,06	8,00	180	0,850	16,17	0,05	Drehzahl hat gesponnen (zu schnell gefahren; sollte eigentlich ca. 10kn fahen)	
51	32	x	x		LF1 Head_2	11,70	14,02	13,00	180	0,740	7,88	0,10		
52	33	x	x		LF1 Head_2	11,70	14,02	13,00	180	0,880	7,24	0,06		
53	34				LF1 TUB Head2	7,81	9,00	8,00	180	1,350	14,37	0,08		
54	35				LF1 TUB Head2	7,81	9,00	8,00	165	1,211	13,90	0,09		
55	36				LF1 TUB Head2	7,81	9,00	8,00	165	0,838	8,59	0,03	Mess 98 Fühlmessung. Daten nicht konvertieren	
56	37				LF1 TUB Head2	7,81	9,00	8,00	180	0,980	9,38	0,03		

Abb. 59: Seegangversuche vom März 2008 – „Norröna“ („head seas“ und „following seas“)

S302-Nr.	Video-Nr.	PreSimulation	RotSimulation	Ladefall	Seeg. Name	Seeg. Name	T ₀	C _{res}	f _{res}	δ _{res}	Amplitude	V _{max}	Ph _{max}	f _{max}	Bemerkung	Datum
Bankdefinition: Bezugspunkt: Modell bis Mitte GSW = 11.62 m (Null) / Modell Wind in einem 12 m Abstand dahinter.																
LF 2 T = 6.00 m TR = 0.000 m GM = 3.074 m																
67																
70																
Reliefperiode = 16.46																
71	1		x	LF2					30.00	1.02		0.00	92			
71	1		x	LF2					40.00	1.97		0.00	95.8			
71	1		x	LF2					50.00	2.95		0.00	98.4			
73	2	x		LF2	FSG 7		8.00	9.48	5.00	---	7.45	0.00	78.1	106.00	Seegang / kein Wind	
74	3	x		LF2	FSG 8.8m		13.00	15.41	8.00	---	18.21	0.00	77.96	59.00	Seegang / kein Wind	
75	4	x		LF2	FSG 9.8m		15.00	17.78	8.00	---	18.15	0.00	71.04	57.00	Seegang / kein Wind	
76	5	x		LF2	TUB 1		16.50	19.55	8.00	---	13.87	0.00	79.53	70.00	Seegang / kein Wind	
77	7	x		LF2	FSG 7		8.00	9.48	5.00	---	5.14	0.00	87.84	105.00	Seegang mit Wind	
78	8	x		LF2	FSG 8.8m		13.00	15.41	8.00	---	17.64	0.00	87.92	59.00	Seegang mit Wind	
79	9	x		LF2	FSG 9.8m		15.00	17.78	8.00	---	16.91	0.00	91.8	59.00	Seegang mit Wind	
80	10	x		LF2	FSG 9.8m		15.00	17.78	8.00	---	19.19	0.00	87.12	57.00	Seegang mit Wind	
81	11	x		LF2	FSG 9.8m		15.00	17.78	8.00	---	16.43	0.00	86.72	57.00	Seegang mit Wind	
82	12	x		LF2	FSG 8.8m		13.00	15.41	8.00	---	16.74	0.00	87.94	59.00	Seegang mit Wind	
83	13	x		LF2	TUB 1		16.50	19.55	8.00	---	14.21	0.00	84.72	70.00	Seegang mit Wind	
84	14	x		LF2	TUB 1		16.50	19.55	8.00	---	15.10	0.00	88.63	70.00	Seegang mit Wind	
85	-			LF2					30.00	---	2.06				Messung der statischen Krängung, keine MGC-Messung!!! 1x5kg von Bb nach Sbb und 1x5kg von Bb in Mitte verschoben.	
86	-			LF2					30.00	---	3.33				Messung der statischen Krängung, keine MGC-Messung!!! 1x5kg von Bb nach Sbb und 1x5kg von Bb in Mitte verschoben.	
87	15	x		LF2	FSG 7		8.00	9.48	5.00	---	3.33	4.42	93.22	105.00	Seegang / kein Wind / statische Vorkrägung	
88	16	x		LF2	FSG 9.8m		15.00	17.78	8.00	---	3.33	18.70	102.38	57.00	Seegang / kein Wind / statische Vorkrägung	
LF 1 T = 6.10 m TR = 0.400 m GM = 4.490 m																
89																
90																
Reliefperiode = 14.1s																
91	17	x		LF1			0.00	0.00	30.00	0.79		0.00	93	57.00	Wind / kein Seegang / 30 Hz	
91	17	x		LF1			0.00	0.00	40.00	1.35		0.00	92.9	56.00	Wind / kein Seegang / 40 Hz	
91	17	x		LF1			0.00	0.00	50.00	2.07		0.00	95.1	59.00	Wind / kein Seegang / 50 Hz	
Ollücke am Wellenruder / Fortsetzung der Versuch ca. 14.30 Uhr																
92	18	x		LF1	FSG4		12.00	14.22	5.00	---	21.20	0.00	70.1	60.00	Seegang / kein Wind	
93	19	x		LF1	FSG4		12.00	14.22	5.00	---	21.84	0.00	79.99	60.00	Seegang mit Wind / 2. Lüfter von innen ist ausgefallen!	
Versuche werden nur mit 3 Lüftern fortgesetzt.																
94	20	x		LF1	FSG4		12.00	14.22	12.00	---	36.06	0.00	55.77	60.00		
95	21	x		LF1	FSG4		12.00	14.22	12.00	50.00	35.79	0.00	77.87	60.00		
96	22	x		LF1	FSG4		12.00	14.22	8.00	---	30.39	0.00	64.7	60.00		
97	23	x		LF1	FSG4		12.00	14.22	8.00	50.00	30.02	0.00	86.2	60.00		
98	24	x		LF1	FSG2-10		10.00	11.85	10.00	---	23.83	0.00	66.1	106.00		
99	25	x		LF1	FSG2-10		10.00	11.85	10.00	50.00	26.45	0.00	85.44	106.00		
100	26	x		LF1	FSG2-10		10.00	11.85	10.00	30.00	27.91	0.00	73.8	106.00		
101	27	x		LF1					30.00	3.2		0.00	84.2			
101	27	x		LF1					50.00	2.9		0.00	80			

Abb. 60: Seegangsversuche vom Mai 2008 – „Norröna“ („beam seas“, quertreibendes Schiff)

Anhang B

Daten-CD

Inhalt:

- I) Bericht, Berichtsblatt, Document Control Sheet und Erfolgskontrollbericht in elektronischer Form
- II) folgende im Rahmen dieses Projekts entstandene Veröffentlichungen in elektronischer Form (alle Veröffentlichungen finden sich auch im Literaturverzeichnis):
 - 1.) Diplomarbeiten
 - „Herve, P. N., (2006): Wellenlasten auf ein RoRo-Schiff im Seegang. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin“
 - „Klein, M. (2007): Druckfelder in extremen Seegängen. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin“
 - „Testa, D. (2006): Vorhersage kritischer Wellengruppen aus Seegangsregistrierungen im Ortsbereich. Diploma-Thesis. Technische Universität Berlin“
 - 2.) Doktorarbeiten
 - „Stempinski, F. (2009): On Wave Kinematics in Harsh Seaway and Freak Waves. PhD-Thesis, Technische Universität Berlin“
 - 3.) Internationale Veröffentlichungen (conference paper)
 - „Clauss, G. F., Kosleck, S., Sprenger, F. und Boeck, F. (2009): Adaptive Stretching of Dynamic Pressure Distribution in Long- and Short-Crested Seas, OMAE 2009 - 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA.“
 - „Clauss, G. F., Kosleck, S. und Testa, D. (2009a): CASH- Decision Support System for Computer Aided Ship Handling. In Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 2009, Hamburg, Germany.“
 - „Clauss, G., Kosleck, S., Testa, D., Stück, R., (2007): Forecast of Critical Wave Groups from Surface Elevation Snapshots, OMAE 2007 - 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, USA.“

„Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., Hessner, K., (2008): Forecast of Critical Situations in Short Crested Seas, OMAE 2008 - 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal.“

„Claus, G., Kosleck, S., Testa, D., (2009b): Critical Situations of Vessel Operations in Short Crested Seas – Forecast and Decision Support System – , OMAE 2009 - 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA.“

„Claus, G. F., Stempinski, F., Stück, R. (2008): On Modelling Kinematics of Steep Irregular Seaway and Freak Waves. In OMAE 2008 - 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal. OMAE2008-57228.“

4.) weitere für dieses Projekt wichtige Veröffentlichungen, die bereits vor Projektbeginn entstanden sind

„Hennig, J. (2005): Generation and Analysis of Harsh Wave Environments. PhD-Thesis, Technische Universität Berlin“

III) Matlab-Quellcode für den entwickelten ‚3-D Wave Forecast‘
(Superpositionsmethode und IFFT-Ansatz)

Matlab-Quellcode für den entwickelten ‚Ship Motion Forecast‘

Matlab-Quellcode für den entwickelten ‚Adaptive Stretching‘ Ansatz zur Berechnung von Druckfeldern im Seegang

Matlab_Quellcode für den entwickelten Approximationsansatz zur Berechnung des Potentials unter irregulären Wellen mittel Überlagerung nichtlinearer Stokes-Wellen höherer Ordnung