Nichtlineare Vorhersage kritischer Strukturantworten in irregulärem Seegang

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Matthias Dudek
geb. in Berlin

von der Fakultät V — Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Gerd Holbach
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Günther F. Clauss
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Paul Uwe Thamsen
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Robert Bronsart

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19.03.2018

Berlin 2018

"Welcher Entdecker hat das schon bemessen,
wie weit sich die äußersten Vorgebirge der Möglichkeit
ins Meer der Unmöglichkeit erstrecken?"

Johann Nestroy

Danksagung

Diese Arbeit basiert auf meinen Forschungsergebnissen im Verbundprojekt PrOWOO – Prognose Optimaler Wetterfenster für Offshore Operationen – welches ich am Fachgebiet Meerestechnik der Technischen Universität Berlin begleiten durfte. Ich möchte mich hiermit bei allen Beteiligten für die Zusammenarbeit und Unterstützung innerhalb der letzten Jahre diesbezüglich bedanken.

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Günther Clauss bedanken, welcher mich durch seine Hartnäckigkeit und vor allem seine fachliche Kompetenz stets auf dem richtigen Kurs hielt. Seine Erfahrung, Leidenschaft und Begeisterungsfähigkeit für meerestechnische Probleme haben mich von Anfang an fasziniert und bis zuletzt umfassend unterstützt. Darüber hinaus möchte ich mich bei meinem zweiten Gutachter Prof. Dr.-Ing. Paul Uwe Thamsen, meinem dritten Gutachter Prof. Dr.-Ing. Robert Bronsart sowie dem Vorsitzenden des Promotionsausschusses Prof. Dr.-Ing. Gerd Holbach für ihre Bereitschaft und Interesse an meiner Arbeit bedanken.

Außerdem möchte ich mich bei den Kollegen am Fachgebiet, besonders Antonio Lengwinat, Sebastian Uharek und Sven Stuppe, für eine angenehme, produktive und vor allem unterhaltsame Arbeitsatmosphäre bedanken. Besonderer Dank gilt außerdem meinem Kollegen und Projektpartner Marco Klein, welcher mich nicht nur zu Beginn meiner wissenschaftlichen Laufbahn in die richtige Richtung wies, sondern auch bis zuletzt mit Rat und Ideen zu dieser Arbeit beigetragen hat. Herzlicher Dank gilt Kornelia Tietze, welche mit Leichtigkeit die Windmühlen der Bürokratie auf Abstand und uns somit unsere Köpfe frei hielt. Für die technische Unterstützung sowie ihr Interesse bei Modellbau und -versuchen möchte ich mich vor allem bei Manfred Berndt und Haiko de Vries bedanken. Großer Dank gilt zuletzt auch unseren studentischen Mitarbeitern für die stete und verlässliche Unterstützung bei den Modellversuchen sowie der Datenauswertung.

Besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie dem Projektträger Jülich, welche durch die Förderung des Forschungsvorhabens diese Arbeit erst ermöglicht haben. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Projektpartnern von OceanWaves für die gute Zusammenarbeit bedanken. Ein großes Dankeschön gilt auch meinen neuen Kollegen bei Warnow Design, welche mich vor allem in der Schlussphase dieser Arbeit stets verständnisvoll mit Rat und Hilfe unterstützten.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Frau Claudia, welche mich stets ermutigt und unterstützt hat. Ich bewundere ihre Energie und Liebe mit welcher sie mich während dieser Arbeit aktiv unterstützte und gleichzeitig unsere Familie in Einklang hielt. Großer Dank gilt auch meinen beiden Kindern Leonard und Helene, welche mich unermüdlich an die wirklich wichtigen Dinge im Leben erinnern. Zuletzt möchte ich meinen Eltern danken, welche stets großes Vertrauen in mich setzten, viel ertragen mussten und trotzdem stets hinter mir standen.

Abstract

The general feasibility of offshore operations is constrained by limiting design criteria such as absolute or relative motions of the participating structures. For short term operations, the prevailing sea state and the accompanied structure responses have to be analysed precisely in advance. Maximum reliability of operation and economic feasibility require accurate methods for reliable decision support in rough or precarious conditions. A precise deterministic motion prediction system for floating offshore operations is still missing.

Conventional procedures analyse and assess the expected operating conditions via stochastic methods. This enables the determination of probability for the excess of limiting structure responses – for definite time and region – as well as the classification of incoming sea states in feasible and infeasible. This also includes two major disadvantages: First of all, the stochastic analysis determines the probability of exceedance of design structure responses. Rare sea state events – in terms of critical wave trains or rogue waves – can appear anyway and therefore jeopardise the reliability of offshore operations. Secondly, the stochastic analysis implies a critical economic drawback. If the corresponding parameter exceeds a certain limit, the whole operation has to be intermitted, which frequently results in serious, weather-related downtime and unpredictable operation costs. However, most of the infeasible sea states based on stochastic analysis will feature favourable wave sequences – in particular in the transition area between feasible and infeasible region of a scatter diagram – which would allow safe short-term offshore operations but are elapsed unused.

In this thesis, the first validated holistic numerical method to identify short term, suitable wave sequences and operation conditions via deterministic wave and motion prediction is presented. Suitable wave sequences within infeasible sea states (downtime reduction) as well as critical wave elevations in moderate sea conditions (safety issues) can be detected and therefore lead to a significant increase of safety and efficiency of offshore operations.

The presented numerical method divides into three major parts. In a first step, the approaching stochastic sea state is registered continuously via radar, far ahead of the operating ground.

In the next step, the developing wave train is calculated using numerical, non-linear methods. For the numerical calculation, the *Non-linear Schroedinger Equation* (NLS) as well as the *Higher Order Spectral Method* (HOSM) are applied, which enable the estimation of wave propagation considering non-linear wave-wave interactions within very short calculation time. Both numerical procedures are compared to a well established non-linear numerical method as well as validated by extensive model tests.

Finally, the predicted wave sequences lead to the structure responses – in terms of absolute and relative motions – in time domain, which are determined using an advanced form of Impulse Response Functions (F2T+) in time domain exclusively.

As a result, a holistic sea state and motion prediction program is presented – this includes the automatic registration and evaluation of the incoming sea state, the sea state prediction for the operational ground, the resulting structure responses and the identification and recommendation for favourable operation windows. The application of very fast numerical algorithms allows the future motion prediction – the operational foresight – for the intended offshore operation.

Kurzfassung

Die Durchführbarkeit von Offshore-Operationen hängt von limitierenden Designkriterien wie Absolut- bzw. Relativbewegungen der beteiligten Strukturen ab. Daher müssen vor der Operation, die oft nur ein bis zwei Minuten andauert, der vorherrschende Seegang und die damit einhergehenden Bewegungen exakt analysiert werden. Für das Erreichen größtmöglicher Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit sind präzise Methoden gefordert, welche zuverlässige Entscheidungshilfen bei grenzwertigen Umweltbedingungen liefern. Eine exakte deterministische Bewegungsvorhersage für schwimmende Strukturen ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst.

Nach konventionellen Methoden werden die zu erwartenden Betriebszustände mittels stochastischer Verfahren analysiert. Damit lässt sich für einen festgelegten Zeitrahmen die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten einer limitierenden Bewegungsgröße innerhalb eines Seegebietes bestimmen sowie Aussagen über Zulässigkeit bzw. Unzulässigkeit bestimmter Seegänge machen. Dieses Vorgehen impliziert zwei grundsätzliche Nachteile: Zum einen ermöglicht die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung die Abschätzung des Risikos hinsichtlich der Überschreitung tolerierbarer Bewegungen. Sehr seltene Seegangsereignisse – ungünstige Wellenfolgen oder hohe Einzelwellen – können jedoch trotzdem auftreten und gefährden somit die Betriebssicherheit jeglicher Operation. Zum anderen ergibt sich aus dem stochastischen Verfahren ein schwerwiegender wirtschaftlicher Nachteil. Sind die vorherrschenden Seegangsparameter laut stochastischer Analyse unzulässig für die geplante Operation, warten die beteiligten Strukturen ab, bis der Seegang zulässige Charakteristik aufweist. In den meisten Seegängen treten jedoch häufig günstige Wellensequenzen auf, die eine kurzfristige Operation im Minutenbereich erlaubt hätten, so aber ungenutzt verstreichen.

Mit dieser Arbeit liegt erstmals ein validiertes, ganzheitliches, numerisches Verfahren vor, um kurzfristige, geeignete Seegangsbedingungen bzw. Operationsfenster – meist genügen $90\,s$ für kurzfristige Offshore-Operationen, wie Hubschrauberlandungen oder kritische Kranoperationen – im laufenden Betrieb mittels deterministischer Bewegungsvorhersage zu identifizieren und so Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Offshore-Operationen zu erhöhen.

Hierfür wird in einem ersten Teilschritt der stochastische Seegang in größerer Entfernung vom Operationsgebiet kontinuierlich mittels Radar er-

fasst.

Aufbauend hierauf wird die Entwicklung des Wellenfeldes bei Annäherung an die Strukturen nach numerischen, nichtlinearen Methoden berechnet. Zur Vorhersage des Seegangs werden die *Nichtlineare Schrödinger Gleichung* (NLS) sowie die *Higher Order Spectral Method* (HOSM) implementiert, die die Berechnung der Wellenentwicklung unter Berücksichtigung nichtlinearer Welle-Welle-Interaktion in sehr kurzer Rechenzeit erlauben. Die numerischen Verfahren werden mit Hilfe bewährter, numerischer, voll nichtlinearer Methoden sowie umfangreichen Modellversuchen validiert und bewertet.

Hieraus folgen die am Ort der Strukturen wirkenden Wellensequenzen, über die die Strukturantworten – in Form von Absolut- und Relativbewegungen – in einem letzten Teilschritt mit Hilfe einer Weiterentwicklung der Impulsantwortfunktion (*F2T+*) direkt im Zeitbereich ermittelt werden.

Als Ergebnis liegt ein ganzheitliches Bewegungsvorhersageprogramm vor – dies umfasst die automatische Registrierung und Auswertung des Seegangs, die Seegangsvorhersage für ein Operationsgebiet, die daraus resultierenden Strukturbewegungen sowie die Identifizierung und Empfehlung für mögliche Operationszeitfenster. Die generelle Nutzung numerischer Methoden mit sehr schnellen Berechnungsalgorithmen ermöglicht die vorausschauende Bewegungsprognose – den Blick in die Zukunft – für die geplanten Offshore-Operationen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Gliederung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines experimentell validierten Programmsystems zur Identifizierung günstiger Zeitfenster für Offshore-Operationen mittels deterministischer Bewegungsvorhersage.

Im aktuellen Kapitel wird die Problemstellung sowie der Bedarf deterministischer Seegangs- und Bewegungsvorhersage für Offshore-Operationen dargestellt. Ziele und Methoden werden definiert und anhand des Standes der Technik für Seegangserfassung, Seegangsvorhersage, Bewegungsvorhersage und Entscheidungshilfesystemen konkretisiert.

Im Anschluss werden in Kapitel 2 die verwendeten Referenzverfahren erläutert – experimentelle Analyseverfahren in Form problemspezifischer Seegangsanalysen sowie numerische Analyseverfahren in Form eines etablierten, nichtlinearen, numerischen Wellenkanals. Zusätzlich werden Evaluationsverfahren beschrieben, mit Hilfe derer die gewonnenen Ergebnisse innerhalb dieser Arbeit bewertet und verglichen werden können.

Der Hauptteil der Arbeit untergliedert sich in die Themenbereiche der Seegangs- und Bewegungsvorhersage. In Kapitel 3 werden für die Seegangsvorhersage zwei nichtlineare Verfahren vorgestellt, deren Einsatzbereiche und -grenzen anhand kritischer Normwellengruppen identifiziert und bewertet werden. Anhand eines definierten Beispielszenarios werden abschließend natürliche, irreguläre Seegänge im Zeit- und Ortsbereich prognostiziert, validiert und bewertet.

Aufbauend auf die prognostizierten Seegänge wird in Kapitel 4 die Bewegungsvorhersage im Zeitbereich durchgeführt. Dazu wird die verwendete Methode erläutert und anhand bestehender Methoden bewertet. Das Bewegungsverhalten eines hydrodynamisch gekoppelten Mehrkörpersystems – eines Kranhalbtauchers in Operation mit einer Transport-Barge – wird numerisch ermittelt, um viskose Dämpfungsbeiwerte erweitert und anschließend experimentell validiert. Abschließend erfolgt die Bewegungsvorhersage

auf Basis des zuvor prognostizierten Seegangs und wird ganzheitlich anhand experimenteller Ergebnisse validiert und bewertet.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengetragen und erörtert. Weiterführende Problemstellungen und Lösungsansätze werden in Form eines Ausblicks zusammengefasst.

1.2 Motivation

Die Durchführbarkeit von Offshore-Operationen (Beispiele siehe Abb 1.1) hängt hauptsächlich von limitierenden Absolut- bzw. Relativbewegungen der beteiligten Strukturen ab. Daher müssen vor der Operation, die oft nur wenige Minuten andauert, der vorherrschende Seegang und die damit einhergehenden Bewegungen exakt analysiert werden. Für das Erreichen größtmöglicher Sicherheit und Wirtschaftlichkeit sind präzise Methoden gefordert, welche zuverlässige Entscheidungshilfen bei grenzwertigen Umweltbedingungen liefern. Eine exakte deterministische Bewegungsvorhersage für schwimmende Systeme ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst, für erhöhte Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit von Offshore-Operationen jedoch von essentieller Bedeutung.

Abbildung 1.1: *Beispiele für seegangsabhängige Offshore-Operationen: Kranoperation bei der Installation eines Windparks, Side-by-Side LNG-Transfer, Hubinsel beim Ausfahren ihrer Beine, Bergung einer Tiefseestation mit einem kabelgebundenen Dockersystem, Helikopterlandung auf einem fahrenden Schiff.*

1.2.1 Problemstellung

Nach konventioneller Methode werden die zu erwartenden Betriebszustände mittels stochastischer Verfahren analysiert. Damit lässt sich für einen festgelegten Zeitrahmen die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten einer limitierenden Bewegungsgröße innerhalb eines Seegebietes bestimmen. Die

stochastische Analyse ermöglicht somit Aussagen über Zulässigkeit bzw. Unzulässigkeit bestimmter Seegänge.

Dieses Vorgehen impliziert zwei grundsätzliche Nachteile:

- Die Wahrscheinlichkeitsbetrachtung ermöglicht die Abschätzung des Risikos hinsichtlich der Überschreitung tolerierbarer Bewegungen, jedoch können seltene, kritische Seegangsereignisse (ungünstige Wellenfolgen, hohe Einzelwellen) damit nicht berücksichtigt werden.

- Neben diesem Sicherheitsaspekt ergibt sich aus diesem Konzept auch ein schwerwiegenderer wirtschaftlicher Nachteil: Sind die vorherrschenden Seegangsparameter laut stochastischer Analyse unzulässig für die geplante Operation, warten die beteiligten Schiffe und Plattformen ab, bis der Seegang eine günstigere Charakteristik aufweist. In den meisten Seegängen (insbesondere im Übergangsbereich zwischen zulässigen und unzulässigen Seegängen) treten jedoch häufig günstige Wellensequenzen auf, die eine kurzfristige Operation im Minutenbereich erlaubt hätten, so aber ungenutzt verstreichen und sich in Folge dessen die Operationskosten deutlich erhöhen.

Somit kann die stochastische Analyse keine kurzfristigen, geeigneten Seegangsbedingungen bzw. Operationsfenster – ein Wetterfenster von 90 s genügt meistens für kurzfristige Offshore-Operationen, wie Hubschrauberlandungen oder kritische Kranoperationen – im laufenden Betrieb identifizieren, was zu unnötigen Ausfallzeiten und dadurch zu erhöhten Operationskosten führt. Ebenso wenig können in stochastisch zulässigen Seegängen unerwartete kritische Wellensequenzen erfasst werden, welche ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen.

Ein deterministisches Prognoseverfahren zur Identifizierung kurzfristiger, geeigneter Seegangsbedingungen – oder aber kritischer Wellengruppen – und den hieraus resultierenden Belastungen und Bewegungen der beteiligten Strukturen kann diese Lücke schließen und somit die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Offshore-Operationen signifikant erhöhen.

1.2.2 Offshore-Strukturanalyse

Jede Offshore-Struktur stellt ein individuelles, hydrodynamisches Transfersystem dar, welches durch die Anregung mittels natürlichen Seegangs die entsprechenden Strukturantworten hervorruft. Für die Beschreibung dieses Strukturverhaltens in beliebigem Seegang können Übertragungsfunktionen [1] verwendet werden, welche die Reaktion der Struktur auf eine definierte Anregung quantifizieren.

Sowohl der einfallende, natürliche Seegang als auch die entsprechende Strukturantwort lassen sich unter der Voraussetzung linearen Verhaltens

[1] RAO – Response Amplitude Operator

in harmonische Komponenten unterschiedlicher Frequenzen aufteilen. Abbildung 1.2 stellt den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal (erste Zeile) sowie deren frequenzabhängige Zerlegung in harmonische Komponenten (äußere Spalten) schematisch dar. Demnach reagiert ein lineares System auf eine harmonische Erregung der Frequenz ω_n mit einer phasenverschobenen Antwort derselben Frequenz. Das Verhältnis der komplexen Ausgangs- und Eingangssignale – Antwort zu Erregung – ergibt die Übertragungsfunktion

$$H(\omega_n) = \frac{s(\omega_n)}{\zeta(\omega_n)} = \frac{s_{an}}{\zeta_{an}} e^{i\epsilon_n}, \tag{1.1}$$

wobei die komplexen Ein- bzw. Ausgangsgrößen sowohl den Betrag als auch die Phase berücksichtigen. Das Verhältnis zwischen Ein- bzw. Ausgangsam-

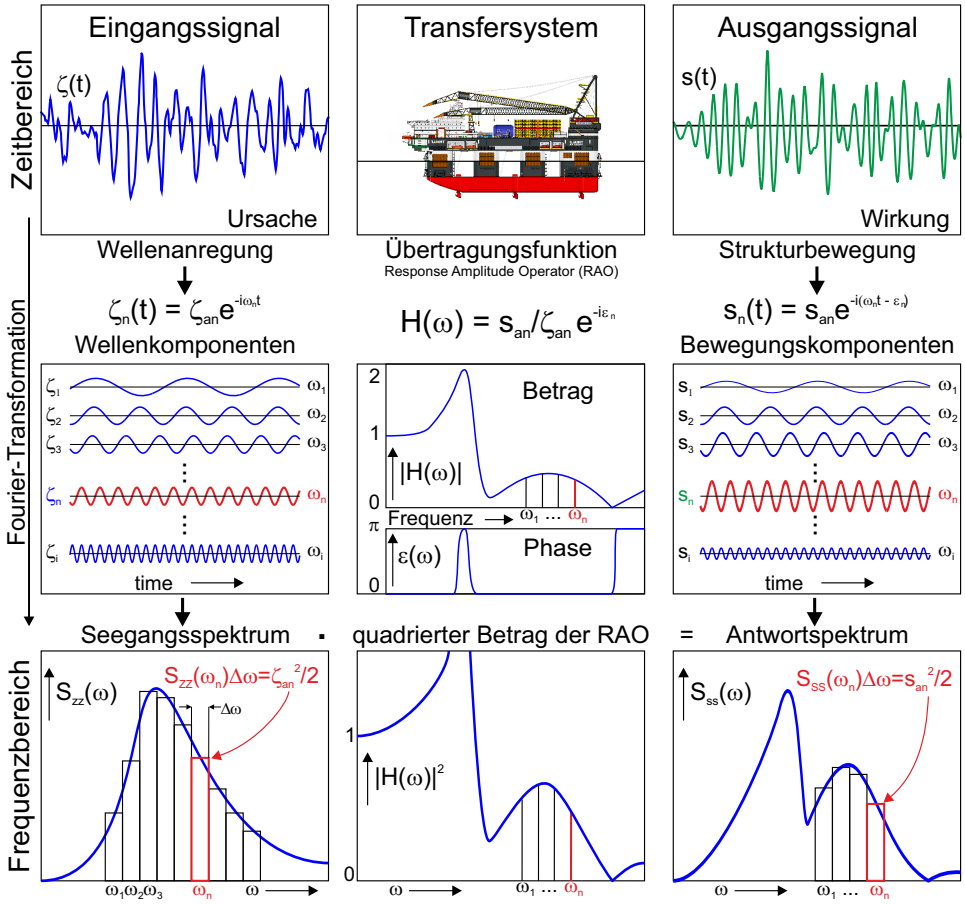

Abbildung 1.2: *Übertragungsfunktion eines beliebigen hydrodynamischen Systems als Zusammenhang aus Eingangs- und Ausgangssignal (nach Clauss et al. (1992)).*

plituden ist zentral in Abbildung 1.2 als Betrag der Übertragungsfunktion

$$|H(\omega)| = \frac{s_{an}}{\zeta_{an}} \tag{1.2}$$

inklusive dazugehöriger Phasenlage ϵ_n über die Wellenkreisfrequenz ω dargestellt.

Aus dem Produkt des Frequenzintervalls $\Delta\omega$ und der spektrale Energiedichte $S_{ZZ}(\omega)$ ergibt sich die normierte Energie einer Elementarwelle ζ_n

$$S_{ZZ}(\omega_n)\Delta\omega = \frac{1}{\rho g}E(\omega_n) = \frac{1}{2}\zeta_{an}^2, \tag{1.3}$$

welche der halben quadrierten Wellenamplitude entspricht und über die Kreisfrequenz ω aufgetragen das Seegangsspektrum ergibt.

Analog dazu ergibt sich das Antwortspektrum aus den harmonischen Komponenten der Strukturantwort

$$S_{SS}(\omega_n)\Delta\omega = \frac{1}{2}s_{an}^2. \tag{1.4}$$

Verbunden durch den Betrag der quadrierten Übertragungsfunktion $|H(\omega)|^2$ verhalten sich die spektralen Energiedichten wie die quadrierten Amplituden

$$\frac{S_{SS}(\omega_n)}{S_{ZZ}(\omega_n)} = \frac{s_{an}^2}{\zeta_{an}^2} = |H(\omega)|^2 . \tag{1.5}$$

Die Übertragungsfunktion beschreibt folglich das Strukturverhalten im Frequenzbereich und bestimmt die Systemantwort in Abhängigkeit des jeweiligen Eingangsspektrums über

$$S_{SS}(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_{ZZ}(\omega). \tag{1.6}$$

1.2.3 Ziele und Methoden

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines experimentell validierten 2D-Programmsystems zur Identifizierung günstiger Zeitfenster für Offshore-Operationen mittels deterministischer Bewegungsvorhersage der beteiligten Strukturen. Durch Nutzung bereits vorhandener kontinuierlicher Radarerfassung soll der Seegang in 2-3 Seemeilen Entfernung identifiziert werden, welcher 3-4 Minuten später die Struktur erreicht. Durch nichtlineare Methoden wird die Entwicklung des Wellenfeldes zum Ort der Offshore-Operation zweidimensional ermittelt und somit der zu erwartende (zukünftige) Seegang prognostiziert. Zur Vorhersage des Seegangs werden zwei nichtlineare Methoden implementiert – die Nichtlineare Schrödinger (NLS)-Gleichung sowie die Higher Order Spectral Method (HOSM) – welche die Berechnung der Wellenentwicklung unter Berücksichtigung nichtlinearer Interaktionen in sehr kurzer Rechenzeit ermöglichen. In Kenntnis

des prognostizierten Seegangs können Belastungen und Bewegungen von Schiffen und Offshore-Strukturen für kurzfristige Operationen im Minutenbereich zuverlässig vorausgesagt werden. Hierfür können Strukturantworten mit Hilfe einer Weiterentwicklung der Impulsantwortfunktion – F2T+ (Jacobsen (2005)) – direkt aus der vorhergesagten Wellensequenz berechnet werden. Das F2T+ -Verfahren ist direkter und eleganter als das bisherige spektrale Verfahren: Transformation der Wellensequenz aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich, Berechnung des Antwortspektrums des Systems sowie Rücktransformation der Strukturbewegungsinformation in den Zeitbereich. Somit lassen sich günstige Wellensequenzen in unzulässigen Seegängen zeitnah identifizieren, wodurch Effizienz und Sicherheit des Einsatzes signifikant verbessert werden.

Insgesamt lassen sich drei Kernbereiche für das geplante, deterministische Prognoseverfahren identifizieren:

- Seegangserfassung,
- Seegangsvorhersage und
- Bewegungsvorhersage.

Abbildung 1.3 stellt den schematischen Ablauf der einzelnen Kernbereiche sowie deren Interaktion grafisch dar.

Zunächst wird der umgebende Seegang mit Hilfe des vorhandenen Radarsystems gemessen. Das grundlegende Verfahren zur Seegangserfassung ist das von der Firma OceanWaveS GmbH entwickelte, operationelle Seegangsmesssystem WaMoS® II[2], basierend auf einem nautischen X-Band-Radar, welches eine gute Basis für eine stetige Messung des aktuell vorhandenen Seegangs sowie der Oberflächenströmung ermöglicht. Dazu werden die Radardaten im Nahbereich für ein definiertes Zielgebiet ausgewertet – die nachfolgende Analyse liefert neben statistischen Seegangsgrößen (H_S, T_P, Strömung, etc.) auch eine Momentaufnahme des umgebenden Seegangs im Ortsbereich. Unter der Annahme langkämmigen Seegangs wird der 2D[3]-Schnitt ($\zeta(x) \rightarrow$ X/Z-Schnittebene) in Welleneinfallsrichtung extrahiert und für die nachfolgende Seegangsvorhersage verwendet.

Für die Seegangsvorhersage wird, basierend auf dem zuvor ermittelten Wellenzug im Ortsbereich, die nichtlineare Simulation des Seegangs mittels NLS/HOSM durchgeführt. Sie ermöglicht eine schnelle und genaue Vorhersage des Seegangs für die Zielposition im Zeitbereich unter Berücksichtigung nichtlinearer Welle-Welle-Interaktionen.

Abschließend wird auf Basis des prognostizierten Seegangs die Strukturantwort mit Hilfe des F2T+ -Verfahrens im Zeitbereich ermittelt. Dazu werden zunächst die Impulsantwortfunktionen (IAF) aus den jeweiligen Übertragungsfunktionen (RAO) gebildet. Durch Faltung der IAF mit

[2] Wave and Surface Current Monitoring System
[3] eindimensional in einer zweidimensionalen Mannigfaltigkeit

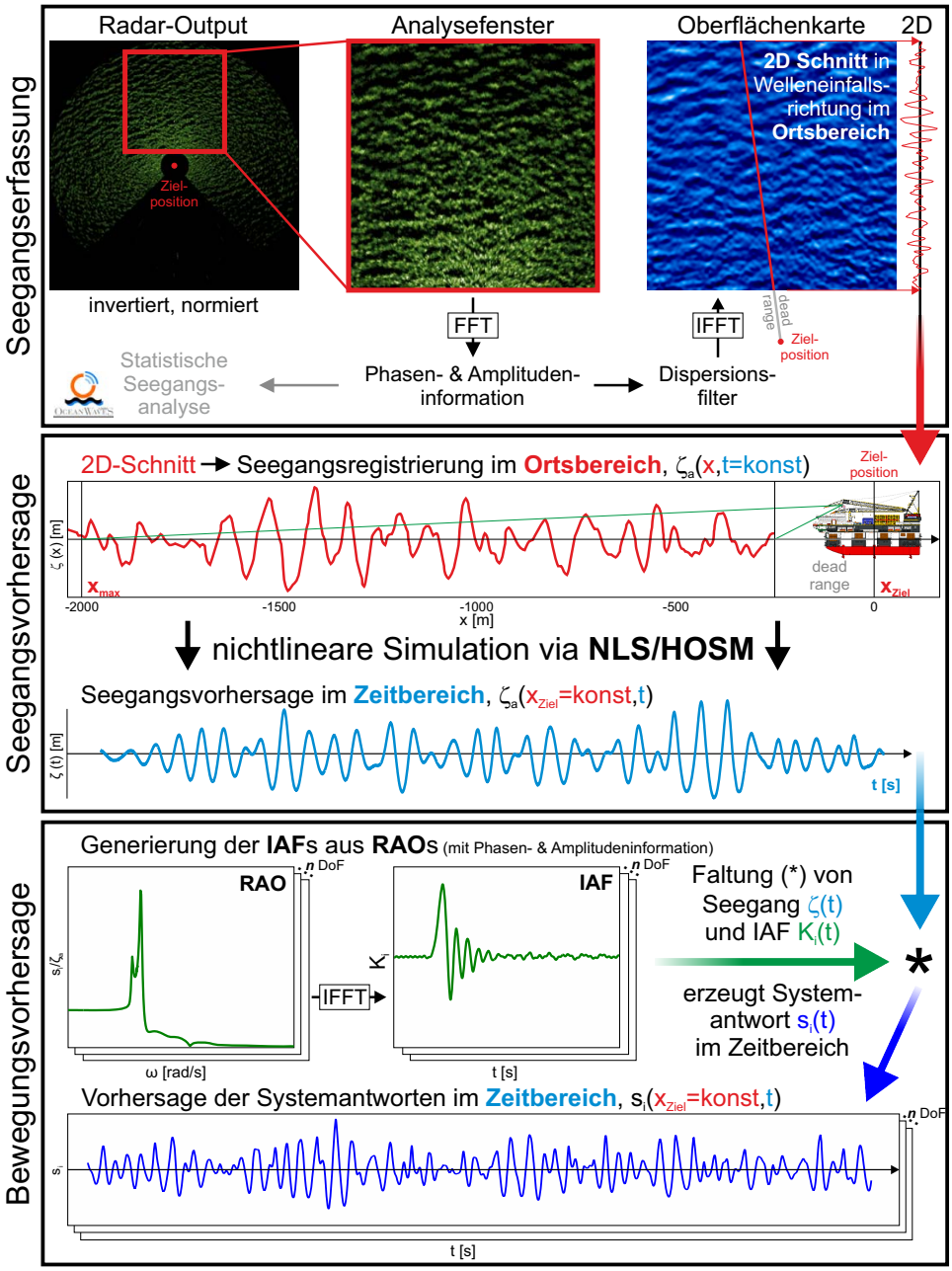

Abbildung 1.3: *Schematischer Ablauf der nichtlinearen Seegangs- und Bewegungsvorhersage:* ***Seegangserfassung*** *– Auswertung der invertierten und normierten Radardaten zur Ermittlung des einlaufenden 2D-Wellenzugs im Ortsbereich;* ***Seegangsvorhersage*** *– nichtlineare Seegangsvorhersage im Zeitbereich auf Basis des Wellenfeldes im Ortsbereich;* ***Bewegungsvorhersage*** *– Vorhersage der Systemantworten im Zeitbereich durch Faltung der IAF (Impulsantwortfunktion) mit dem prognostizierten Seegang im Zeitbereich.*

dem zuvor prognostizierten Seegang können die Strukturantworten direkt im Zeitbereich vorhergesagt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die beiden letzten Kernbereiche entwickelt, analysiert und bewertet.

1.3 Stand der Technik

Im Folgenden wird der dieser Arbeit zugrunde liegende Stand von Wissenschaft und Technik für die drei identifizierten Kernbereiche zusammengefasst. In Hinblick auf das Ziel dieser Arbeit – deterministisches Prognoseverfahren zur Identifizierung kurzfristiger, geeigneter Seegangsbedingungen – wird außerdem auf den Stand der Technik hinsichtlich verfügbarer Entscheidungshilfesysteme eingegangen.

1.3.1 Seegangserfassung

Zur Erfassung von Seegangsdaten existieren in der Fernerkundungstechnik verschiedene Messverfahren, wie z.B. satellitengestützte Messverfahren oder bodengestützte Systeme. Sowohl Seegangs- als auch Strömungsparameter können mit Hilfe von Fernerkundungsverfahren berührungslos für große Areale registriert werden.

Die Seegangserfassung mittels nautischem X-Band-Radar hat sich in den letzten Jahren sehr bewährt, sowohl stationär als auch mobil (an Bord). Flächendeckende Seegangsmessungen von einem fahrenden Schiff aus sind mit herkömmlichen Messmethoden (z.B. Seegangsbojen) nur sehr schwer und unter hohem Aufwand zu realisieren.

Das Wave and Current Monitoring System WaMoS® II der Firma OceanWaveS GmbH gehört zu den ersten radargestützten Seegangsmessgeräten auf dem Markt und wird seit Ende der 90er Jahre kontinuierlich weiterentwickelt. Es ermöglicht eine kontinuierliche Seegangserfassung mittels zumeist existierenden Navigationsradarsystemen (X-Band-Radar) und realisiert somit eine stetige Überwachung des vorhandenen, aktuellen Seegangs inklusive Strömung.

Das WaMoS® II registriert dabei die an der Wasseroberfläche reflektierten Radarsignale, so dass im Nahbereich der Radarantenne (bis ca. $3\,sm$[4]) das Rauschsignal (sea clutter) empfangen und interpretiert wird, um die Seegangs- und Strömungsparameter live zu berechnen. Dies hilft sowohl bei der Einschätzung vorherrschenden Seegangs als auch bei der Navigation bei eingeschränkter Sicht.

1.3.2 Seegangsvorhersage

Der Ausgangspunkt für die mathematische Beschreibung des Seegangs ist die Massen- und Impulserhaltung, welche sich – unter Berücksichtigung viskoser Effekte – in die Navier-Stokes-Gleichung überführen lässt. Sowohl die Navier-Stokes-Gleichung als auch deren direkte Vereinfachung, die Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) - Gleichung, lassen sich nur mittels komplexer numerischer Methoden approximativ lösen, die sich unter dem Be-

[4] $1\,sm = 1,852\,km \mathrel{\widehat{=}} 1/60$ Breitengrad

griff *Computer Fluid Dynamics* (CFD) zusammenfassen lassen. All diese Methoden implizieren, dass neben numerischen Unzulänglichkeiten hinsichtlich der Wellenausbreitung über große Distanzen (Stichwort numerische Dämpfung) die Berechnungsdauer sehr hoch ist. Aus beiden Gründen werden CFD-Methoden nicht für Seegangssimulationen verwendet und kommen auch nicht für die geplante Seegangsvorhersage in Betracht.

Fast alle in Forschung und Wirtschaft verwendeten Verfahren zur Seegangssimulation beruhen auf Potentialtheorie, da Zähigkeitseffekte und Turbulenzen im Seegang vernachlässigt werden können ohne signifikanten Einfluss auf die Lösung zu haben (Wellenbrechung wird hier nicht betrachtet). Hierbei wird der Flüssigkeitsraum als Newtonsches Fluid angenommen (inkompressibel und reibungsfrei). Somit vereinfacht sich die Navier-Stokes-Gleichung, da der Flüssigkeitsraum als Gradient eines skalaren Geschwindigkeitspotentials definiert werden kann, und wird mit der Laplace-Gleichung beschrieben. Um diese zu lösen, müssen die Randbedingungen des Flüssigkeitsraumes erfüllt werden. Die nichtlinearen Terme in den beiden Oberflächenrandbedingungen und die Tatsache, dass die kinematische Oberflächenrandbedingung an der unbekannten Wasseroberfläche erfüllt werden muss, erschweren die Lösung des Randwertproblems erheblich, so dass auch hier eine geschlossene Lösung nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurden Näherungslösungen für das Randwertproblem entwickelt, welche auf der Perturbationstheorie beruhen – das Randwertproblem der Laplace-Gleichung wird approximativ gelöst. Hierbei wird zwischen numerischen und analytischen Verfahren sowie zwischen Lösungen der verschiedenen Ordnungen unterschieden, die die Genauigkeit der approximierten Lösung definieren. Lösungen erster Ordnung sind lineare Lösungen, die zwar die meisten Vereinfachungen des Randwertproblems beinhalten, jedoch aufgrund ihrer analytischen Form auch eine sehr schnelle Berechnung der Seegangsausbreitung ermöglichen. Bei Lösungen höherer Ordnungen werden die Glieder der Taylorreihenentwicklung beim Perturbationsansatz entsprechend der jeweiligen Ordnung entwickelt.

Generell gilt, dass mit zunehmender Komplexität des Randwertproblems die Berechnungsdauer signifikant ansteigt, andererseits auch die Genauigkeit der Seegangssimulation zunimmt. Dieser Zusammenhang zeigt den Grundkonflikt bei der Entwicklung eines Seegangsvorhersagesystems, welches hohe Genauigkeit der Simulation/Vorhersage bei gleichzeitig sehr geringer Berechnungsdauer erfordert.

In den letzten Jahren sind verschiedene lineare und auch nichtlineare Ansätze unter der Prämisse der Seegangsvorhersage präsentiert worden, um den gemessenen Seegang zu beliebigen Zielen in Raum und Zeit zu transformieren (vgl. Payer and Rathje (2004); Clauss et al. (2007, 2009a,b); Naaijen and Huijsmans (2008, 2010); Naaijen et al. (2009); Kosleck (2013)). Der große Nachteil der nichtlinearen Methoden ist die Rechendauer, die der Echtzeitprognose entgegenwirkt. Daher kommen nur sehr schnelle numeri-

sche Verfahren für das Prognoseprogramm in Betracht.

Die in dieser Arbeit zur Anwendung kommende NLS-Gleichung ermöglicht eine schnelle Berechnung der Wellenausbreitung unter Berücksichtigung wichtiger nichtlinearer Effekte. Die NLS-Gleichung ist in den letzten Jahrzehnten intensiv numerisch wie auch experimentell untersucht worden (Klein (2015)), gilt als robust – physikalisch wie auch mathematisch (Its and Kotljarov (1976)) – und wird erstmals für die Seegangsvorhersage verwendet. Die NLS-Gleichung beruht auf der Annahme geringer Wellensteilheit und kleiner spektraler Bandbreite, wodurch sich die Randwertprobleme signifikant vereinfachen lassen. Um die Limitierungen dieser Annahme zu bewerten und gegebenenfalls zu vermeiden, wird zusätzlich die Higher Order Spectral Method (HOSM) für die Seegangsprognose implementiert und untersucht, da sie hinsichtlich Schnelligkeit und Genauigkeit eine vielversprechende Alternative darstellt.

Die HOSM wurde unabhängig von West et al. (1987) und Dommermuth and Yue (1987) präsentiert, wobei für die vorliegende Arbeit die Prozedur von West et al. (1987) verwendet wird. Bei der HOSM wird im Gegensatz zu den meisten gängigen potentialtheoretischen Verfahren das Randwertproblem des freien Flüssigkeitsraums auf die unbekannte freie Flüssigkeitsoberfläche transformiert. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass nur die unbekannte Oberfläche und nicht der gesamte Flüssigkeitsraum diskretisiert werden muss, wodurch der Rechenaufwand signifikant verringert wird. Wu (2004) und Blondel et al. (2008) verwendeten die HOSM erstmals für die deterministische Rekonstruktion und Vorhersage von irregulärem Seegang und bestätigten die Effektivität und die Genauigkeit der HOSM für Langzeit- und Großraum-Simulationen. Clauss et al. (2014, 2015b) untersuchten die HOSM erstmals für die Vorhersage nichtlinearer Wellengruppen in variierenden Wassertiefen und erzielten gute Vorhersagegenauigkeiten auch für sehr steile, nichtlineare Wellengruppen.

1.3.3 Bewegungsvorhersage

Erste Analysen zu hydrodynamisch gekoppelten Mehrkörpersystemen sind in den 60er Jahren an simplen, kubischen Strukturen mit zweidimensionalen Streifenmethoden veröffentlicht worden. In den 70er Jahren wurde diese Berechnungsmethode erweitert, wodurch Wechselwirkungen komplexer Strukturen – wie z.B. zwischen zwei nebeneinander liegenden Strukturen in seitlichem Seegang – analysiert werden konnten (Ohkusu (1974, 1976)). Die Entwicklung der dreidimensionalen Panelmethode ermöglichte die Untersuchung beliebiger Strukturen (Faltinsen and Michelsen (1974)). Dabei erfolgte die Berechnung der erregenden Wellenkräfte aufgrund der hohen Panelanzahl nicht mehr mit direkten Methoden, sondern durch asymptotische Näherungsverfahren (Newman (2001)). Aktuelle Entwicklungen konzentrieren sich hauptsächlich auf Schnelligkeit und Genauigkeit der numerischen

Lösungsmethoden (Newman and Lee (2001)).

Das in dieser Arbeit verwendete 3D-Diffraktions-Radiationsprogramm WAMIT®[5] – basierend auf Potentialtheorie – berechnet die Starrkörperbewegung für hydrodynamisch kompakte Strukturen im Frequenzbereich (vgl. WAMIT Inc. (2012)). Somit können die Bewegungsübertragungsfunktionen jeder beliebigen Struktur im Seegang für alle Freiheitsgrade bestimmt und analysiert werden. Diese validierte numerische Methode ist üblich bei der Konstruktion und Planung meerestechnischer Konstruktionen, vernachlässigt jedoch, da auf Potentialtheorie basierend, viskose Effekte. Diesbezüglich wurde am Fachgebiet Meerestechnik der TU Berlin eine Methode zur Berücksichtigung viskoser Terme entwickelt und erfolgreich implementiert. Die zu implementierenden Größen werden dazu im Modellversuch ermittelt und über zusätzliche Matrizen in das Programm integriert. Das so weiterentwickelte Programmsystem wurde validiert und in verschiedenen Forschungsprojekten erfolgreich eingesetzt.

Da sich die bisher beschriebenen Methoden auf den Frequenzbereich beschränken, sind die Ergebnisse für die Bestimmung von Einsatzgrenzen zwar ungemein wertvoll, aber nur statistischer Natur. Um einen kausalen Zusammenhang von Ursache und Wirkung herstellen zu können, ist es unumgänglich, Analysen im Zeitbereich durchzuführen. Auch die Bestimmung der Sensibilität des Systems bezüglich definierter Wellensequenzen kann nur im Zeitbereich erfolgen: Untersuchungen an Offshore-Strukturen haben gezeigt, dass nicht nur die Wellenhöhe, sondern vor allem die Frequenzanteile des Seegangs sowie die Wellenfolge das Bewegungsverhalten dominieren. Um auf aktuell eintretende Seegangsereignisse kurzfristig reagieren zu können, bedarf es einer vorausschauenden Seegangsanalyse im Zeitbereich. Die Bewegungsübertragungsfunktion der zu untersuchenden Struktur ist dabei von großer Bedeutung – aus ihr kann die Impulsantwortfunktion gebildet werden. Sind die Impulsantwortfunktionen für ein gegebenes System bekannt, ist es möglich, mittels Faltung die Systemantwort in jedem beliebigen Wellenzug zu berechnen. Mit diesem Verfahren wird sowohl die hydrodynamische Kopplung zwischen den Strukturen als auch der Einfluss der gegenwärtigen Phasenlagen („memory effects“) auf die späteren Bewegungen berücksichtigt (Cummins (1962)). Dieses Verfahren wurde von Jacobsen (2005) weiterentwickelt (F2T+) und ermöglicht auch die detaillierte Untersuchung der Wirkungen von Extremwellenereignissen (Freak Waves, kritische Wellengruppen, etc.) auf Offshore-Strukturen.

1.3.4 Entscheidungshilfesysteme

Entscheidungshilfesysteme für die Durchführbarkeit von Offshore-Operationen basieren auf den im Entwurf festgelegten Systemeinsatzgrenzen. Nach

[5] Wave Analysis at Massachusetts Institute of Technology, WAMIT Inc. (2012)

konventioneller Methode werden hierfür die zu erwartenden Betriebszustände unter Berücksichtigung dieser Einsatzgrenzen mittels (linearer) stochastischer Verfahren analysiert. Dazu werden die zu erwartenden maximalen Bewegungen für alle sechs Freiheitsgrade der zu untersuchenden Offshore-Struktur über die Seegangsstatistik abgeleitet. Der Seegang wird durch die signifikante Wellenhöhe H_S (Mittelwert der 1/3 höchsten Wellen) und die mittlere Zero-upcrossing Periode T_0 charakterisiert. Dieses Vorgehen impliziert die bereits erwähnten, grundsätzlichen Nachteile in Bezug auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit.

Die stochastische Analyse ermöglicht die Wahrscheinlichkeitsabschätzung hinsichtlich der Überschreitung tolerierbarer Strukturbewegungen und -belastungen – kritische Seegangsereignisse (ungünstige Wellenfolgen, hohe Einzelwellen) können jedoch trotzdem auftreten, was hinsichtlich der Operationssicherheit unannehmbar ist.

Sind dagegen die vorherrschenden Seegangsparameter laut stochastischer Analyse unzulässig für die geplante Operation, warten die beteiligten Strukturen auf zulässige Einsatzcharakteristika. In den meisten Seegängen (insbesondere im Übergangsbereich zwischen zulässigen und unzulässigen Seegängen) treten jedoch häufig günstige Wellensequenzen auf, die eine kurzfristige Operation im Minutenbereich erlaubt hätten, so aber ungenutzt verstreichen.

Die stochastische Analyse ist demzufolge ungeeignet, kurzfristig Seegangsbedingungen im laufenden Betrieb zu identifizieren, was zu erhöhten Operationskosten wie auch -risiken führt. Obwohl in den letzten Jahren Methoden und Ansätze entwickelt wurden, um zusätzliche Entscheidungshilfen im Betrieb zu geben, ist eine deterministische Bewegungsvorhersage für schwimmende Strukturen bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Der die Struktur umgebende Seegang wird dabei entweder aktiv oder passiv ermittelt.

Bei der passiven Methode wird die Schiffsbewegung aufgezeichnet und mit Hilfe der bekannten Bewegungsübertragungsfunktionen auf das Seegangsspektrum zurückgeschlossen (Iseki (2009)). Die passive Methode impliziert automatisch, dass der Seegang bereits verstrichen ist. Sie ist daher für die Vorhersage unbrauchbar, soll aber der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Die hiermit verknüpften Methoden werden zur Ist-Zustandsanalyse des Seegangs verwendet, um dann mittels statistischer Datengrundlage Entscheidungshilfen zu geben. Ein Beispiel dafür ist das SeaSense Seakeeping Decision Support System (Nielsen and Iseki (2010)), welches vor allem als Entscheidungshilfesystem bei parametrischem Rollen eingesetzt wird.

Aktiv bedeutet, dass die Wasserspiegelauslenkung mit Hilfe von Pegeln, Lasern, Messbojen oder Radar gemessen wird. Insitu-Sensoren wie Pegel, Laser und Bojen besitzen einige operationelle Nachteile, weshalb nur die radargestützte Seegangserfassung für die Verwendung innerhalb eines Bewegungsvorhersageprogramms in Betracht kommt. Bei den radargestützten

Seegangserfassungssystemen gibt es bislang keinen Anbieter, der die deterministische Seegangs- bzw. Bewegungsvorhersage kommerziell vertreibt. Das operationelle Seegangsmesssystem WaMoS® II, welches die Vorteile der zeitlichen Erfassung von Insitu-Verfahren mit der räumlichen Darstellung des Seegangs kombiniert, liefert bis zum jetzigen Stand der Technik die wichtigsten spektralen Parameter des umgebenden Seegangs in Echtzeit (Clauss et al. (2007, 2008)). Das der Vorhersage zugrundeliegende WaMoS® II wurde im Laufe der letzten Jahre so weiterentwickelt, dass es in das geplante Vorhersageprogramm als wichtiges Teilsystem integriert werden kann (Clauss et al. (2015a)).

Neben der Seegangserfassung ist die Berechnung der Seegangsausbreitung und somit die Seegangsvorhersage noch nicht zufriedenstellend gelöst, was auch ein Grund dafür ist, dass es bis jetzt keinen kommerziellen Anbieter für solche deterministischen Vorhersageprogramme gibt. Hier sind insbesondere die meist langen Simulationszeiten das Hauptproblem für eine echte Vorhersage. Daher kommen nur sehr schnelle numerische Verfahren für das Prognoseprogramm in Betracht. An der TU Berlin wurde das Entscheidungshilfesystem CASH entwickelt (Computer Aided Ship Handling, Clauss et al. (2009b)), das – von einer gegebenen, ortsabhängigen Wellenerhebung – die zeitliche Entwicklung des Seegangs nach linearer Theorie berechnet. Dieses Verfahren ist schnell in seiner Berechnungszeit, gilt jedoch nur für flache Seegänge, da die Nichtlinearität der Oberflächenrandbedingung nicht berücksichtigt und die Wellenausbreitung nach der linearen Dispersionsgleichung berechnet wird.

1.3.5 Zusammenfassung

Die stochastische Analyse ermöglicht eine Wahrscheinlichkeitsabschätzung der Überschreitung tolerierbarer Systemgrenzen – individuelle Wellengruppen und Seegangsereignisse können nicht berücksichtigt werden, was erhöhte Operationskosten erzeugt und hinsichtlich der Operationssicherheit unannehmbar ist. Eine deterministische Seegangs- und Bewegungsvorhersage im Zeitbereich ist daher von essentieller Bedeutung!

Die bereits existierenden Verfahren und Methoden für die deterministische Prognose von Strukturbewegungen im Seegang sind nicht einsetzbar, da sie entweder gänzlich ungeeignet sind oder zu viel Berechnungszeit benötigen. Eine der Hauptschwierigkeiten zur erfolgreichen Implementierung eines zuverlässigen Bewegungsvorhersagesystems ist daher die geschickte Wahl schneller (und trotzdem hinreichend genauer) Algorithmen, um das Hauptziel zu erreichen – die Prognose der Strukturbewegung einige Minuten vor Eintreffen der jeweiligen Wellensequenz.

Kapitel 2

Referenzverfahren

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Analyse eines Programmmoduls zur nichtlinearen Seegangsvorhersage sowie der darauf aufbauenden Bewegungsvorhersage. Um die einzelnen numerischen Verfahren – für die Seegangsvorhersage wie auch für die Bewegungsvorhersage – analysieren, validieren und bewerten zu können, werden innerhalb dieses Kapitels zwei grundlegende Referenzverfahren vorgestellt. Zum einen die klassische Methode der Modellversuche im Seegangsbecken einer Versuchsanstalt, zum anderen die numerische Methode anhand des voll nichtlinearen Wellenkanals waveTUB[1]. Abschließend werden zwei Evaluationsverfahren vorgestellt, mit deren Hilfe die numerischen Ergebnisse innerhalb dieser Arbeit bewertet werden können.

2.1 Experimentelle Analyseverfahren

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden verschiedene numerische Verfahren zur Seegangsvorhersage analysiert. Um Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden analysieren und auswerten zu können, werden verschiedenartige Seegänge verwendet; zum Einen irreguläre Seegänge für die realistische Vorhersage natürlichen Seegangs, zum Anderen maßgeschneiderte Wellengruppen für die gezielte Untersuchung einzelner, kritischer Seegangsparameter.

Des Weiteren werden Modellversuche zur Validierung der numerisch ermittelten Übertragungsfunktionen durchgeführt. Dies geschieht in erster Linie mit transienten Wellengruppen. Für die Analyse einzelner, kritischer Frequenzen können zusätzlich reguläre Wellen verwendet werden. Mit den validierten Übertragungsfunktionen wird abschließend die Bewegungsvorhersage in natürlichem, irregulärem Seegang untersucht.

[1] **wave** simulation tool developed at **T**echnische **U**niversität **B**erlin, Steinhagen (2001)

Seegangsanalyse

Hauptursache für die Entstehung natürlichen Seegangs ist vor allem der Wind, der je nach Streichdauer, -richtung und -länge dreidimensionalen, kurzkämmigen Seegang erzeugt. Natürliche Seegänge sind für Versuche nur schwer und mit viel technischem Aufwand reproduzierbar. Daher werden für die Nachbildung natürlichen Seegangs in den Versuchseinrichtungen vereinfachende Annahmen getroffen.

Sowohl die Analysen zur Seegangsvorhersage als auch die Validierung der Übertragungsfunktionen und der Bewegungsvorhersage finden im Seegangsbecken der TU Berlin statt. Das Becken hat eine Länge von $120\,m$, eine Breite von $8\,m$ und eine Wassertiefe von $1\,m$. Am Ende des Beckens ist ein Strand installiert, welcher die Reflexionen minimiert. Die computergesteuerte Wellenmaschine kann beliebige, maßgeschneiderte, langkämmige Seegänge generieren und reproduzieren.

Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über die Bandbreite der zur Verfügung stehenden Seegänge und Methoden. Die für die experimentelle Analyse zugrundeliegenden Seegänge sowie speziell entwickelte Wellengruppen werden im Folgenden erläutert:

- **Regulärer Seegang** – stellt die grundlegendste Seegangsform in der Modellversuchstechnik dar. Hierbei werden Wellenzüge mit konstanter Wellenlänge/Periode und Amplitude generiert, um frequenzabhängige Phänomene gezielt untersuchen zu können.

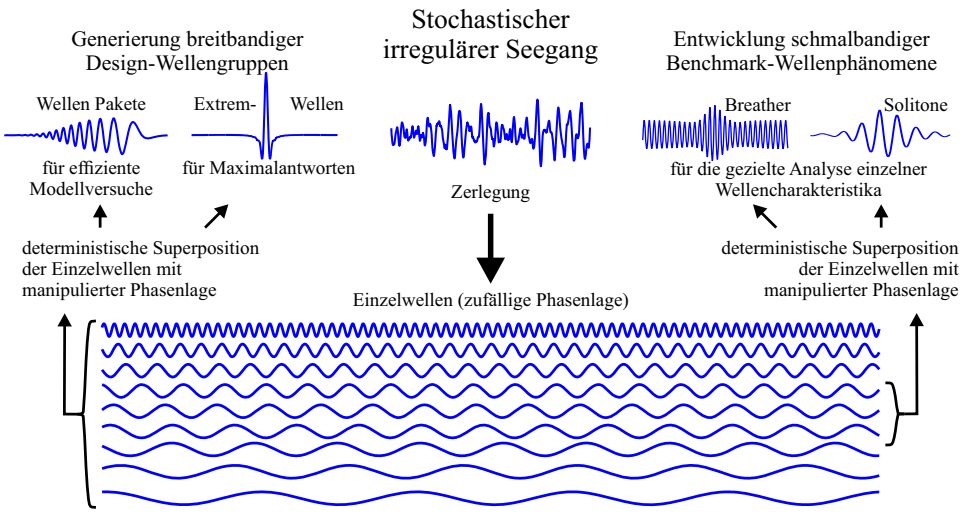

Abbildung 2.1: Darstellung der Seegangsgenerierung – Manipulation der Phasenlage für schmal- und breitbandige Analyseseegänge (modifiziert nach Klein (2015)).

- **Irregulärer Seegang** – bildet die Basis der experimentellen Seegangsanalyse. Mit Hilfe irregulärer Seegänge kann natürlich auftretender Seegang am besten modelliert und wiedergegeben werden. Durch die Überlagerung regulärer Wellen unterschiedlicher Periode, Amplitude und Phase können beliebige – willkürlich sowie deterministisch definierte – irreguläre Seegänge generiert werden. Darüber hinaus lassen sich kritische Einzelwellen für Extremwertanalysen gut in den natürlichen Seegang integrieren.

Durch die Zerlegung natürlichen Seegangs in seine Elementarwellen ergibt sich das Seegangsspektrum, welches die Verteilung und Charakteristik des Seegangs definiert. Darüber hinaus bietet sich in der Versuchstechnik durch deterministische Variation der jeweiligen Einzelwellen mit manipulierter Phasenlage die Möglichkeit maßgeschneiderte Wellengruppen zu generieren. Dies führt zu

- **breitbandigen Design-Wellengruppen** – in Form von Wellenpaketen für effiziente Modellversuche sowie Extremwellenereignissen für maximale Systemantworten. Ein Beispiel hierfür bilden die transienten Wellengruppen, welche nachfolgend genauer erläutert werden.

sowie zu

- **schmalbandigen Norm-Wellengruppen** – mit Hilfe derer einzelne Wellencharakteristika, wie zum Beispiel die Wellensteilheit oder die relative Wassertiefe, detailliert analysiert werden können. Bei diesen „Benchmark“-Wellengruppen werden die nichtlinearen Welle-Welle-Interaktionen gezielt für die Generierung dieser kritischen Wellengruppen verwendet.

Transiente Wellengruppen

Für experimentelle Analysen im gesamten Frequenzbereich sind die erwähnten Methoden nicht hinreichend beziehungsweise sehr ineffizient. Mit Hilfe von transienten Wellengruppen, sogenannten transienten Wellenpaketen, kann die Systemantwort jeder beliebigen Struktur innerhalb eines einzigen Versuchs bestimmt werden.

Ein transientes Wellenpaket (TWP) ist ein maßgeschneiderter Wellenzug (vgl. Abb. 2.2), welcher die Dispersionseigenschaften von Wellen – in Form der wellenlängenabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten – ausnutzt, um eine räumlich und zeitlich definierte Maximalwelle zu generieren (Kühnlein (1997)). Grundlegende Idee ist die lineare Superposition aller Elementarwellen in einer einzigen Maximalwelle, ohne Phasenversatz am Konzentrationspunkt. Durch die gezielte, breitbandige Anregung können Strukturantworten innerhalb eines einzigen, kurzen Modellversuchs ermittelt werden.

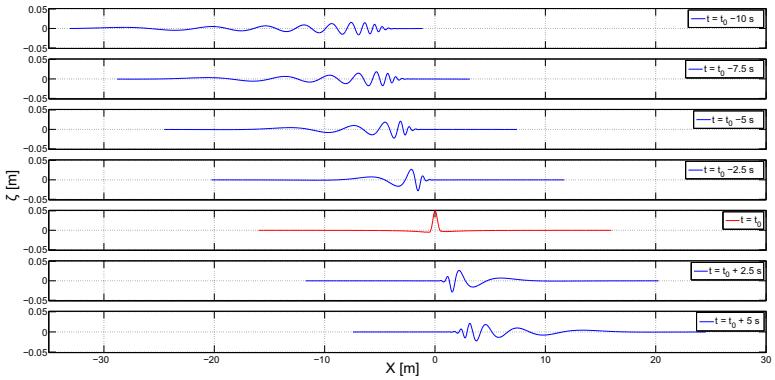

Abbildung 2.2: *Räumliche Entwicklung des Transienten Wellenpaketes – Maximale Superposition des TWP bei $t = 0, x = 0$ (rot, 5te Zeile).*

TWPs bilden eine elementare und etablierte Grundlage für Modellversuche an der TU Berlin.

TWPs wurden erstmals von Davis and Zarnick (1964) eingeführt und von Takezawa and Jingu (1976) weiterentwickelt. Clauss and Bergmann (1986) präsentierten eine modifizierte Variante mit Hilfe von Gauss'schen Wellenpaketen. Hennig (2005) veröffentlichte eine Formulierung zur Berechnung und Generierung nichtlinearer TWPs – hierfür wird ein normiertes, Fourier-ähnliches Spektrum

$$|F(\omega)| = \frac{27 \cdot (\omega - \omega_{min}) \cdot (\omega - \omega_{max})^2}{4 \cdot (\omega_{max} - \omega_{min})^3} \tag{2.1}$$

im relevanten Frequenzbereich definiert. Unter Anwendung der Dispersionsgleichung

$$\omega = \sqrt{kg \cdot tanh\,(kd)}, \tag{2.2}$$

kann das frequenzabhängige Spektrum $F(\omega)$ in das wellenzahlabhängige Spektrum $F(k)$ transformiert werden, was die Transformation des Wellenzuges zu jedem beliebigen Punkt im Zeitbereich ermöglicht. Mit der zentralen Wellenzahl k_0 des definierten Spektrums $F(k)$ kann das komplexe Spektrum

$$F(k_j, t_{new}) = F(k_j, t_0) \cdot e^{-i(\omega_j(t_0+t_{new})-k_j(x_{shift}))} \tag{2.3}$$

mit Hilfe der räumlichen Verschiebung

$$x_{shift} = c(k_0) \cdot (t_0 + t_{new}), \tag{2.4}$$

in den Ortsbereich überführt und somit zu jedem beliebigen Start- bzw. Generierungspunkt verschoben werden.

2.2 Numerische Analyseverfahren

Wie bereits in Kapitel 1.3 dargestellt, beruht der Großteil der in Forschung und Wirtschaft verwendeten Verfahren zur Seegangssimulation auf der Potentialtheorie, da Zähigkeitseffekte und Turbulenz im Seegang vernachlässigt werden können, ohne signifikanten Einfluss auf die Lösung zu haben (Wellenbrechung wird hier nicht betrachtet). Unter der Annahme eines inkompressiblen, reibungs- und rotationsfreien Fluides kann der Flüssigkeitsraum als Gradient eines Geschwindigkeitspotentials beschrieben werden, welches der Laplace-Gleichung und folgenden Randbedingungen genügt:

$$\triangle\Phi = 0; \tag{2.5}$$

$$\Phi_z - \Phi_x\zeta_x - \zeta_t = 0 \qquad z = \zeta(x,t); \tag{2.6}$$

$$gz + \frac{1}{2}\left(\nabla\Phi\right)^2 + \Phi_t = 0 \qquad z = \zeta(x,t); \tag{2.7}$$

$$\Phi_z = 0 \qquad z = -d; \tag{2.8}$$

mit $\triangle \equiv (\partial^2/\partial x^2, \partial^2/\partial z^2)$, $\nabla \equiv (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$; der tiefgestellte Index bezeichnet die entsprechende Ableitung. Die nichtlinearen Terme in den beiden Oberflächenrandbedingungen (Gl. 2.6 & 2.7) und die Tatsache, dass die kinematische Oberflächenrandbedingung (Gl. 2.6) an der unbekannten Wasseroberfläche erfüllt werden muss, erschweren die Lösung des Randwertproblems erheblich. Numerische Verfahren ermöglichen die approximative Lösung dieses Randwertproblems, sind jedoch aufgrund der Komplexität sehr rechenintensiv. Vereinfachungen des Randwertproblems, welche auf Perturbationstheorie und Taylorreihenentwicklung beruhen, ermöglichen eine signifikante Reduzierung der Komplexität. Die Wahl des Perturbationsparameters und die gewählte Ordnung der Taylorreihenentwicklung definieren dabei die Genauigkeit und den Anwendungsbereich.

Im Folgenden wird die in dieser Arbeit verwendete numerische Referenzmethode waveTUB erläutert und anhand von Modellversuchen validiert.

waveTUB – numerisches Referenzverfahren

Der zweidimensionale, nichtlineare, numerische Wellenkanal waveTUB[2] basiert auf den Grundlagen der Potentialtheorie (Gl. 2.5 - 2.8) und verwendet als Lösungsstrategie die Finite-Elemente-Methode (FEM). Die freie Flüssigkeitsoberfläche wird mit einem kombinierten Euler-Lagrange-Ansatz beschrieben. Das Wellenfeld wird mittels Runge-Kutta vierter Ordnung zeitlich entwickelt. Länge und Wassertiefe des Kanals werden vorgegeben, ebenso der Typ der (numerischen) Wellenmaschine, welche als „moving wall“ implementiert wird. Dadurch wird die zusätzliche Randbedingung am Wel-

[2] **wave** simulation tool **T**echnische **U**niversität **B**erlin

lenblatt mit

$$\frac{\delta\Phi}{\delta n} = -\dot{x}_B; \tag{2.9}$$

benötigt, damit die normale Fluidgeschwindigkeit gleich der der bewegten Wand $x_B(t)$ (Wellenklappe) definiert ist. Am Ende des Kanals ist eine numerische Böschung auf Basis von Dämpfungstermen in der kinematischen und dynamischen Randbedingung implementiert, mit der Reflexionen vermieden werden. Abbildung 2.3 skizziert das mathematische Modell des numerischen Wellenkanals nach Steinhagen (2001).

waveTUB ist ein etablierter und validierter numerischer Wellenkanal (Clauss and Steinhagen (1999, 2000); Steinhagen (2001); Clauss et al. (2011, 2012)), welcher sich durch hohe Genauigkeit auch in steilen Seegängen auszeichnet. Allerdings ist die verwendete numerische Methode rechenintensiv und folglich langsam, weshalb er zwar für die Anwendung der Seegangsvorhersage nicht in Betracht kommt, als Referenz für die Validierung der Seegangsvorhersage jedoch unverzichtbar ist.

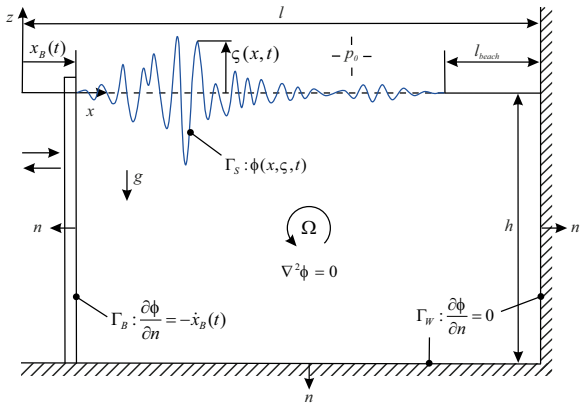

Abbildung 2.3: *Schematische Darstellung des mathematischen Modells von waveTUB (Steinhagen (2001)).*

Anhand einer kritischen Beispielwelle soll der numerische Wellenkanal abschließend validiert werden, um neben seiner bereits dokumentierten Einsatzfähigkeit und Zuverlässigkeit auch sein Prognoseverhalten von nichtlinearen Wellengruppen zu validieren. Dazu wird eine überlagerte, nichtlineare Wellengruppe sowohl numerisch als auch experimentell analysiert. Abbildung 2.4 präsentiert die Registrierung im Zeitbereich – die oberste Zeile zeigt die experimentell gemessene Eingangs-Wasserspiegelauslenkung nah am Wellenblatt ($x = 10\,m$) im Vergleich zur waveTUB Eingangsregistrierung. Die folgenden Zeilen vergleichen die lineare Simulation (zweite Zeile) und die waveTUB-Simulation (dritte Zeile) bei $x = 85\,m$ jeweils mit der experimentell gemessenen Wellensequenz.

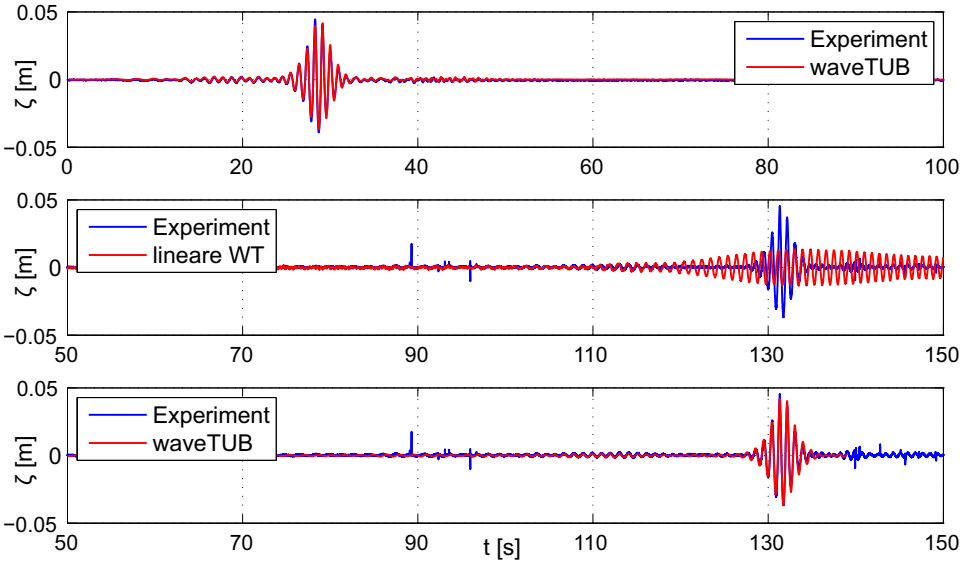

Abbildung 2.4: Wellenausbreitung einer überlagerten, nichtlinearen Wellengruppe im Zeitbereich. Die erste Zeile zeigt die gemessene Wellensequenz nahe am Wellenblatt im Vergleich zur waveTUB-Eingangsregistrierung. Die folgenden Zeilen vergleichen die lineare Simulation (zweite Zeile) und die waveTUB-Simulation (dritte Zeile) bei $x = 85\,m$ jeweils mit der experimentell gemessenen Wellensequenz.

Die Abbildung verdeutlicht, dass die nichtlineare Wellenausbreitung mit Hilfe der linearen Wellentheorie (WT) nicht wiedergegeben werden kann – die Wellengruppe wird instabil und läuft auseinander. Die lineare Wellentheorie scheidet daher als Prognosemethode für die Seegangsvorhersage aus. Der vollständig nichtlineare Wellenkanal waveTUB hingegen gibt den Seegang an der Zielposition perfekt wieder und berücksichtigt sämtliche nichtlinearen Effekte.

Der nichtlineare Wellenkanal waveTUB kommt aufgrund seiner Komplexität und damit verbundenen langen Rechenzeiten für die Prognose nicht in Betracht. waveTUB dient neben den Modellversuchen als zusätzliches Referenzverfahren für die nachfolgenden numerischen Analysen. Insbesondere die Tatsache, dass der physikalische Wellenkanal inklusive Wellenblattgeometrie exakt nachgebildet werden kann, ermöglicht eine genaue numerische Reproduktion der im Wellenkanal erzeugten Wellengruppen. Dieser Umstand wird bei der Validierung im Ortsbereich ausgenutzt, um die benötigten Eingangs-Wellenbilder numerisch zu erzeugen, wodurch der Versuchsaufwand signifikant reduziert wird. Ein weiterer Vorteil von waveTUB ist, dass beliebige Wellenkanalgeometrien simuliert werden können, weshalb waveTUB aufgrund seiner hohen Genauigkeit für ausgewählte Spezialfälle (hinsichtlich Anforderungen an Wassertiefe und Länge des Kanals) exklusiv als Referenz für die Validierung der neu implementierten Vorhersageprogramme verwendet wird.

2.3 Evaluation – Güteparameter

Zusätzlich zu den experimentellen und numerischen Referenzverfahren werden im Anschluss zwei Methoden zur Evaluation beschrieben, um die Güte der Vorhersage des Seegangs oder der Strukturantworten quantitativ bewerten zu können. Dafür werden die Zeitreihen mittels Kreuzkorrelation (ρ) bzw. Surface Similarity Parameter (SSP, nach Perlin and Bustamante (2016)) verglichen.

2.3.1 Kreuzkorrelation

Die Kreuzkorrelation beschreibt die Beziehung zwischen zwei oder mehreren zeitlichen bzw. örtlichen Signalen und erlaubt Rückschlüsse über die Ähnlichkeit dieser Signale. In dem Fall werden die individuellen Energien zweier Signale (E_{f_1}, E_{f_2}),

$$E_{f_1} = \int_0^T f_1^2(t)dt \text{ und} \tag{2.10}$$

$$E_{f_2} = \int_0^T f_2^2(t)dt, \tag{2.11}$$

mit deren Kreuzenergie ($E_{f_1 f_2}$),

$$E_{f_1 f_2} = \int_0^T f_1(t) f_2(t)dt, \tag{2.12}$$

verglichen. Der Korrelationskoeffizient ρ ergibt sich dann aus dem Verhältnis der Kreuzenergie zu den Einzelenergien,

$$\rho = \frac{E_{f_1 f_2}}{\sqrt{E_{f_1} E_{f_2}}}. \tag{2.13}$$

Der Korrelationsfaktor ρ kann Werte zwischen $-1 \leq \rho \leq 1$ annehmen, wobei die Signale für $\rho = -1$ bzw. $\rho = 1$ korrelieren und für $\rho = 0$ orthogonal zueinander liegen (unkorreliert sind). Der Korrelationskoeffizient ist somit ein geeignetes Maß für die Ähnlichkeit zweier Signale. Jedoch gilt dies nur für die Phasenlage und nicht für die Amplitude. Um sowohl die Ähnlichkeit der Phasenlage als auch der Amplitude zweier Signale vergleichen zu können, kann der SSP berechnet werden

2.3.2 Surface Similarity Parameter

Der Surface Similarity Parameter

$$SSP = \frac{(\int |F_{f1}(k) - F_{f2}(k)|^2 dk)^{1/2}}{\int |F_{f1}(k)|^2 dk)^{1/2} + \int |F_{f2}(k)|^2 dk)^{1/2}}, \tag{2.14}$$

mit $F(k)$ als Fouriertransformierte der beteiligten Signale bietet den Vorteil, dass die komplexen Fourierspektren der Signale verglichen werden, wodurch Amplitude und Phase berücksichtigt werden. Im Gegensatz zur Kreuzkorrelation ist perfekte Übereinstimmung bei $SSP = 0$ erzielt, keine Übereinstimmung für $SSP = 1$.

Kapitel 3

Seegangsvorhersage

Aufbauend auf der raderbasierten Seegangserfassung werden in diesem Kapitel zwei nichtlineare Methoden zur Seegangsvorhersage eingeführt. Anhand kritischer Seegangsszenarien werden die Einsatzbereiche und -grenzen beider Methoden evaluiert und bewertet, um abschließend ausgewählte Evaluationsseegänge – kritische Norm-Wellengruppen sowie natürliche, irreguläre Seegänge – im Zeit und Ortsbereich zu prognostizieren.

3.1 Numerische Prognoseverfahren

Zur Vorhersage des Seegangs werden zwei nichtlineare Methoden implementiert – die Nichtlineare Schrödinger (NLS)-Gleichung sowie die Higher Order Spectral Method (HOSM) – welche die Berechnung der Wellenentwicklung unter Berücksichtigung nichtlinearer Welle-Welle-Interaktionen in sehr kurzer Rechenzeit ermöglichen.

Tabelle 3.1 gibt hierfür die qualitativen Rechenzeiten der untersuchten Verfahren (NLS und HOSM) sowie der Referenzmethode (waveTUB) bezüglich einer exemplarischen Prognoselänge von $240\,s$ wieder. Beide Methoden sollen im Folgenden kurz präsentiert und im Anschluss bewertet werden.

Tabelle 3.1: Qualitative Rechenzeiten der verwendeten Prognoseverfahren (bezogen auf einen exemplarischen Simulationszeitraum von $240\,s$).

Verfahren	qualitative Rechenzeit	Methodik	Einschränkung
waveTUB	$>$ 24 Stunden	vollständig nichtlinear	–
NLS	$\leq$ 5 Sekunden	vereinfacht, nichtlinear	prädestiniert für schmalbandige Seegänge
HOSM	20 – 30 Sekunden	nichtlinear	–

3.1.1 Nichtlineare Schrödinger Gleichung

Die Nichtlineare Schrödinger-Gleichung beruht auf der Annahme, dass die Wellensteilheit und die spektrale Bandbreite klein sind, wodurch sich das Randwertproblem (vgl. Kap. 2.2, Gl. 2.5-2.8) signifikant vereinfacht. Wird die Taylorreihenentwicklung nach der zweiten Ordnung abgeschnitten, erhält man die NLS-Gleichung (Mei (1989)) im

- Ortsbereich - zeitliche Entwicklung des Wellenbildes (ONLS)

$$\frac{\partial A}{\partial t} + C_g \frac{\partial A}{\partial x} + i\alpha \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + i\beta |A|^2 A = 0 \tag{3.1}$$

und im

- Zeitbereich - örtliche Entwicklung der Registrierung (TNLS)

$$\frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{C_g} \frac{\partial A}{\partial t} + i\alpha' \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\beta' |A|^2 A = 0, \tag{3.2}$$

mit C_g als Gruppengeschwindigkeit und A der Einhüllenden der Wasserspiegelauslenkung. Die Koeffizienten α, α', β und β' sind von der Trägerfrequenz ω_c bzw. Trägerwellenzahl k_c und der Wassertiefe d abhängig und können wie folgt berechnet werden (Serio et al. (2005)):

$$\alpha = -\nu^2 + 2 + 8(k_c d)^2 \frac{\cosh(2k_c d)}{\sinh^2(2k_c d)}; \tag{3.3}$$

$$\beta = \frac{\cosh(4k_c d) + 8 - 2\tanh^2(k_c d)}{8\sinh^4(k_c d)} - \frac{(2\cosh^2(k_c d) + 0.5\nu)^2}{\sinh^2(2k_c d)\left[\frac{k_c d}{tanh(k_c d)} - (\frac{\nu}{2})^2\right]}; \tag{3.4}$$

$$\alpha' = \frac{1}{8}\frac{\omega_c}{k_c^2}\frac{\alpha}{C_g^3}; \tag{3.5}$$

$$\beta' = \frac{1}{2}\omega_c k_c^2 \frac{\beta}{C_g}; \tag{3.6}$$

$$\nu = 1 + 2\frac{k_c d}{sinh(2k_c d)}. \tag{3.7}$$

Der Koeffizient ν repräsentiert den Korrekturterm für die Gruppengeschwindigkeit in endlicher Wassertiefe.

Für den linearen und nichtlinearen Anteil dieser Gleichungen existieren jeweils separate analytische Lösungen. Jedoch besitzt die NLS-Gleichung, in der beide Anteile berücksichtigt werden, keine allgemeingültige analytische Lösung. Vereinzelt wurden exakte Lösungen entwickelt, womit jedoch (nur) sehr spezielle Wellenphänomene dargestellt werden können (Kuznetsov (1977); Ma (1979); Peregrine (1983); Akhmediev et al. (1987, 2009); Slunyaev et al. (2013)). Die numerische Lösung dieses Problems besteht in

der numerischen Kombination der beiden analytischen Lösungen. Die dazu verwendete numerische Methode, welche auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, heißt „Split-Step-Method“. Die „Split-Step-Method“ ist eine pseudo-spektrale, numerische Methode, mit der nichtlineare partielle Differentialgleichungen, wie die NLS-Gleichung, approximativ gelöst werden können. Die Methode beruht darauf, dass die Lösungen im Zeit- und Ortsbereich in kleinen Schritten iteriert werden, wodurch der lineare und der nichtlineare Teil separat behandelt werden können. Dabei werden die einzelnen Lösungen pro Iterationsschritt im Frequenz- und Zeitbereich approximiert, da die lineare Lösung im Frequenzbereich und die nichtlineare Lösung im Zeitbereich ermittelt werden müssen.

Ein großer Vorteil der NLS-Gleichung gegenüber der linearen Theorie ist die Einbindung nichtlinearer Randbedingungen, wodurch wichtige nichtlineare Effekte mit berücksichtigt werden (z.B. Benjamin-Feir-Instabilität (Benjamin and Feir (1967))). Dadurch kann das Ausbreitungsverhalten des Seegangs realistischer ermittelt werden, insbesondere für potentiell gefährliche Wellensequenzen, z.B. Wellengruppen mit Einzelwellen ähnlicher Frequenzen. Diese kritischen Wellengruppen können die Strukturen im ungünstigen Resonanzbereich anregen und müssen daher frühzeitig identifiziert werden. Außerdem können solche Wellengruppen mit ähnlichen Wellenlängen aufgrund der Benjamin-Feir-Instabilität zu Extremwellen heranwachsen. Beide Phänomene werden von der NLS-Gleichung berücksichtigt. Gegenüber Theorien höherer Ordnung zeichnet sich die NLS-Gleichung durch eine wesentlich geringere Berechnungsdauer aus.

Eine Charakteristik der NLS-Gleichung ist die spektrale Schmalbandigkeit ihrer Approximation. Die dadurch vereinfachte Beschreibung der Wasserwellenausbreitung bringt neben dem Vorteil der schnellen Berechenbarkeit von weniger als 5 Sekunden[1] den Nachteil einer spektral einheitlichen Trägerfrequenz mit sich – dadurch werden die eigentlich frequenzabhängigen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in den Randbereichsfrequenzen über- bzw. unterschätzt. Die Prognose natürlichen Seegangs ist somit für breitbandige Spektren fehlerbehaftet.

Innerhalb dieser Arbeit werden beide Varianten der NLS-Gleichung (TNLS (Gl. 3.2) & ONLS (Gl. 3.1) numerisch implementiert, da dies Vorteile hinsichtlich der Evaluierung und Validierung des Gesamtprogramms hat. Die Verwendung der ONLS (Gl. 3.1) liegt dabei auf der Hand, da für die Wellenvorhersage das Wellenbild der Radarmessung zeitlich zur Offshore-Struktur entwickelt werden soll. Die Implementierung der TNLS (Gl. 3.2) ermöglicht eine umfassende Evaluierung und Validierung im Wellenkanal, da im Wellenkanal der Seegang an einem bestimmten Ort (Wellenblatt) über die Zeit definiert werden muss. Dadurch muss nicht jeder der zu untersuchenden Seegänge erst aufwändig im Ortsbereich (sukzessive Messungen entlang

[1] bezogen auf einen exemplarischen Prognosezeitraum von 240 s.

des Kanals) gemessen werden, um den implementierten Code zu validieren.

3.1.2 Higher Order Spectral Method

Die HOSM repräsentiert die alternative numerische Seegangsvorhersage. Sie ist mit etwa $20 - 30$ Sekunden Rechendauer[2] zwar etwas langsamer im Vergleich zur NLS ($\leq$ 5 Sekunden[2]), kann aber die Seegangsausbreitung deutlich genauer wiedergeben. Insgesamt ist die HOSM ein sehr effektives Verfahren, um komplexe Seegänge über lange Zeiträume und Distanzen akkurat und schnell zu simulieren.

Die HOSM wurde von West et al. (1987) und Dommermuth and Yue (1987) unabhängig voneinander präsentiert. Für das zu entwickelnde Vorhersagesystem wird die Prozedur von West et al. (1987) verwendet. Im Gegensatz zu den meisten gängigen potentialtheoretischen Verfahren wird das Randwertproblem des freien Flüssigkeitsraums (Gl. 2.5 - 2.8) bei der HOSM auf die unbekannte, freie Flüssigkeitsoberfläche transformiert $\Psi(x,t) \equiv \Phi(x, \zeta(x,t), t)$ und es ergibt sich für:

$$\text{die Vertikalgeschwindigkeit:} \quad \zeta_t = -\Psi_x \zeta_x + W(1 + (\zeta_x)^2) \quad \text{und für} \tag{3.8}$$

$$\text{den dynamischen Druck:} \quad \Psi_t = -g\zeta - \frac{1}{2}(\Psi_x)^2 + \frac{1}{2}W^2(1 + (\zeta_x)^2), \tag{3.9}$$

mit $z = \zeta(x,t)$ sowie $W = \Phi_z|_{z=\zeta}$ als vertikale Partikelgeschwindigkeit an der freien Oberfläche und Ψ als unbekanntes Oberflächenpotential. Der große Vorteil dieser Methode ist, dass nur die unbekannte Oberfläche und nicht der gesamte Flüssigkeitsraum diskretisiert werden muss, wodurch der Rechenaufwand signifikant verringert wird. Ein weiterer Grund für die Schnelligkeit dieser numerischen Methode ist die Annahme von periodischen Randbedingungen. Dadurch können das Potential und dessen Ableitungen im Fourierraum sehr schnell berechnet werden. Das unbekannte Potential an der freien Oberfläche wird dabei mittels Taylorreihenentwicklung und Perturbationsansatz approximiert, wodurch Lösungen höherer Ordnung sukzessiv aus den Lösungen niedrigerer Ordnung ermittelt werden können. Die zeitliche Entwicklung des Seegangs erfolgt über ein numerisches Zeitschrittverfahren. Innerhalb dieser Arbeit wird die HOSM bis zur vierten Ordnung entwickelt und als Zeitschrittverfahren wird die Runge-Kutta-Gill-Methode vierter Ordnung verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der numerischen Prozedur findet sich bei West et al. (1987).

Zusammenfassung

Auch wenn waveTUB für die Seegangsvorhersage aufgrund der erheblichen Rechenzeiten für die Vorhersage nicht verwendbar ist, liefert es im Folgenden

[2] bezogen auf einen exemplarischen Prognosezeitraum von 240 s.

sowohl die Eingangssignale (Zeit- und Ortsbereich) als auch das Referenzverfahren und damit eine Validierungsmöglichkeit für Simulationen jenseits der experimentell realisierbaren Rahmenbedingungen (Propagationsdauer und -weite).

Hinsichtlich der Vorhersagequalität unterscheiden sich die einzelnen Methoden in erster Linie in Abhängigkeit des zu prognostizierenden Seegangs. Da in natürlichem Seegang nichtlineare Welle-Welle-Effekte eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen können, sollen die Verfahren hinsichtlich ihrer Prognosegüte für nichtlineare Seegänge bewertet werden. Hierfür werden die unter Abschnitt 3.2.2 eingeführten genormten, kritischen Wellengruppen wie auch anwendungsorientierte, irreguläre Seegänge verwendet.

3.2 Kritische Seegangszenarien

Für eine schnelle und zuverlässige Seegangsvorhersage sollen in diesem Kapitel numerische Methoden untersucht werden, welche nichtlineare Welle-Welle-Interaktionen berücksichtigen und somit eine schnelle und akkurate Vorhersage ermöglichen. Für die Bewertung dieser Methoden werden repräsentative Beispielseegänge verwendet, welche besonders kritische Wellengruppen beinhalten. Dies kann sich zum einen auf die Wellenhöhe (Wellensteilheit), zum anderen auf die Wellenfolge beziehen.

3.2.1 New Year Wave

Die New Year Wave (NYW) – gemessen an der Draupner Plattform am 01. Januar 1995 in der norwegischen Nordsee (Haver and Anderson (2000)) – ist die erste offiziell gemessene „Riesenwelle“und repräsentiert eine der wichtigsten Referenzwellen für die Erforschung von Extremwellen.

Hierbei wurde in einem Seegang mit einer signifikanten Wellenhöhe von $H_S = 12\,m$ eine maximale Einzelwelle von $25,63\,m$ Wellenhöhe mit einer Kammhöhe von $18,5\,m$ registriert (siehe Abbildung 3.1). Die bis dahin als Seemannsgarn abgetane Existenz solcher Riesenwellen – oder auch Freak Waves – wurde hierdurch bestätigt und stellt einen Meilenstein in der Meeresforschung dar. Durch die Brisanz dieses Schlüsselereignisses wurde der Fokus auf die Existenz dieser Freak Waves gerichtet und nachfolgend vielerorts bestätigt. Zahlreiche Plattformen wurden mit Messvorrichtungen ausgerüstet (Wolfram et al. (2000); Mori et al. (2000)), um die Entstehungsprozesse und Auswirkungen auf Offshore-Strukturen zu ermitteln.

Die Klassifizierung einer Freak Wave ist nicht eindeutig geklärt, da zahlreiche Rayleigh-basierte Definitionen hierzu existieren. Hierfür wird das Verhältnis von maximaler zu signifikanter Wellenhöhe bewertet, welches z.B. ab $H_{max}/H_S = 2,3$ (Wolfram et al. (2000)) bzw. $2,4$ (Faulkner (2000)) Freak Waves definiert.

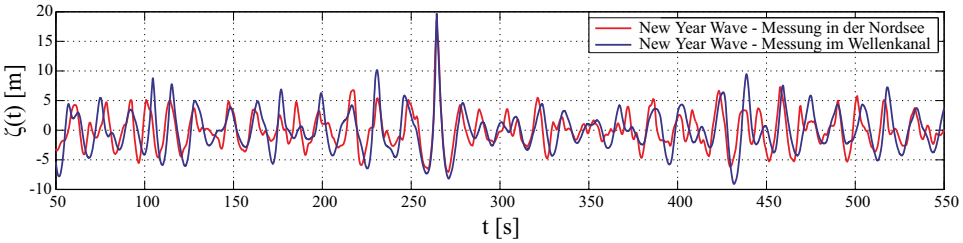

Abbildung 3.1: Vergleich der in der Nordsee registrierten (rot) und der im Seegangsbecken (TUB) reproduzierten (blau) New Year Wave (Clauss and Klein (2011)).

Die NYW stellt ein anerkanntes Extremereignis in der Meerestechnik dar und wurde umfangreich analysiert und experimentell reproduziert (siehe u.a. Clauss and Klein (2009, 2011)). Für die angestrebte Seegangsvorhersage sind Extremwellen ein wichtiger Teilbereich, wobei der Fokus nicht auf die Wellenhöhe allein, sondern auch auf die Abfolge kritischer Wellengruppen gerichtet sein soll. Für eine systematische Untersuchung kritischer Seegangsparameter ist die experimentelle Umsetzung der NYW jedoch nicht zielführend. Im Folgenden werden genormte kritische Wellengruppen präsentiert, mit Hilfe derer kritische Wellenparameter separat analysiert und bewertet werden können.

3.2.2 Kritische Norm-Wellengruppen

Für die Analyse und Bewertung der numerischen Methoden der Seegangsvorhersage sollen im Folgenden genormte kritische Wellengruppen eingeführt und erläutert werden. Diese stellen zum einen hohe Anforderungen an die numerischen Methoden aufgrund der stark nichtlinearen Welle-Welle-Interaktionen. Zum anderen ermöglichen Sie die individuelle Analyse einzelner Wellenparameter in Bezug auf die Vorhersagbarkeit.

3.2.2.1 Breather

„Breather Lösungen“ beschreiben eine Gruppe von analytischen Lösungen der NLS-Gleichung. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um eine mit einer Störung behafteten regulären Wellengruppe. Aufgrund dieser Störung kommt es im Verlauf ihrer Ausbreitung zu nichtlinearen Effekten (Benjamin-Feir-Instabilität), die an einem bestimmten Punkt in Raum und Zeit zu einer extremen Einzelwelle führen.

Die Modulations- oder Seitenband-Instabilität beschreibt im Forschungsbereich der nichtlinearen Optik und Fluiddynamik das nichtlineare Verhalten abweichender, regulärer Wellen, deren zugrundliegende Wellenkomponenten ein sehr enges Frequenzband aufweisen. Dieses Verhalten wurde erstmals von Benjamin and Feir (1967) bei Versuchen mit regulären Tiefwasserwellen (Stokes) beobachtet und reproduziert, und ist daher auch als Benjamin-Feir-Instabilität bekannt. Bei dieser besonders intensiven Welle-Welle-Interaktion verschiebt sich die Energie der Hauptträgerfrequenz in die benachbarten Nebenfrequenzen, wodurch Wellenkomponenten fokussiert überlagert werden und sich Einzelwellen mit Wellenhöhen von mehr als der dreifachen Initialwellenhöhe ausbilden können. Benjamin-Feir-Instabilität gilt als eine mögliche Ursache für Extremwellenereignisse.

Die allgemeine analytische Form der „Breather Lösungen“ (erste Ordnung), abgeleitet von der NLS-Gleichung im Zeitbereich (TNLS) (Gl. 3.2), beschreibt die örtliche Entwicklung der Einhüllenden im Zeitbereich

$$A_B(x,t) = A_c(x)[G(x,t)e^{(i\phi(x))} - 1], \tag{3.10}$$

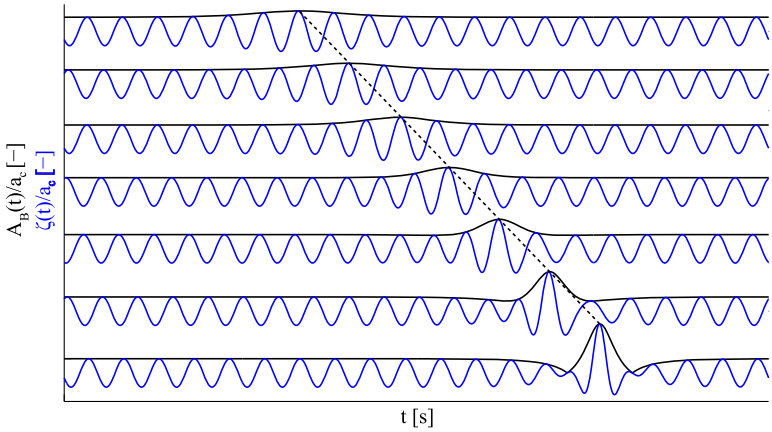

Abbildung 3.2: Verlauf der Wellenausbreitung eines „Peregrine-Breather“ (modifiziert nach Klein (2015)).

bei der G und ϕ reale Funktionen sind, welche ermittelt werden müssen und

$$A_c = a_c e^{\left(-i\beta' a_c^2 x\right)}. \tag{3.11}$$

Eine detaillierte Herleitung dieser allgemeinen Form und der bereits bekannten „Breather Lösungen“ findet sich bei van Groesen et al. (2006) und Karjanto and van Groesen (2007). Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird der sogenannte „Peregrine-Breather“ nach Peregrine (1983) verwendet.

Der „Peregrine-Breather“ stellt den Grenzfall zu den anderen bekannten „Breather Lösungen“ dar, da er weder im Zeit- noch im Ortsbereich periodisch ist: „it is a wave that appears from nowhere and disappears without a trace“ (Akhmediev et al., 2009). Die analytische Form lautet (Karjanto and van Groesen, 2007):

$$A_B(x,t) = A_c(x)\left(\frac{4\alpha'(1 - i2\beta' a_c^2 x)}{\alpha' + \alpha'(2\beta' a_c^2 x)^2 + 2\beta' a_c^2 t^2} - 1\right). \tag{3.12}$$

Ein Breather ist so charakterisiert, dass bereits eine kleine Störung einer regulären Welle im Verlauf des Fortschreitens zu einer Extremwelle heranwächst – im Fall des „Peregrine-Breather“ erreicht die Extremwelle eine dreimal größere Wellenhöhe als zu Beginn der Perturbation. Eine besondere Eigenschaft des „Peregrine-Breather“ ist die Tatsache, dass die maximale Amplifizierung der Perturbation immer drei ist, unabhängig von den gewählten Parametern.

Abbildung 3.2 zeigt die Entstehung dieser Extremwelle im Detail. Die Abbildung zeigt die Einhüllende (schwarz) und die dazugehörige Wasserspiegelauslenkung (blau) eines „Peregrine-Breather“ für definierte Orte im Zeitbereich. Die perturbierte reguläre Welle ist oben abgebildet, die Entwicklung dieser Störung im Verlauf der Wellenausbreitung ist in den darunter folgenden Kurven dargestellt und die maximale Auslenkung ist unten wiedergegeben.

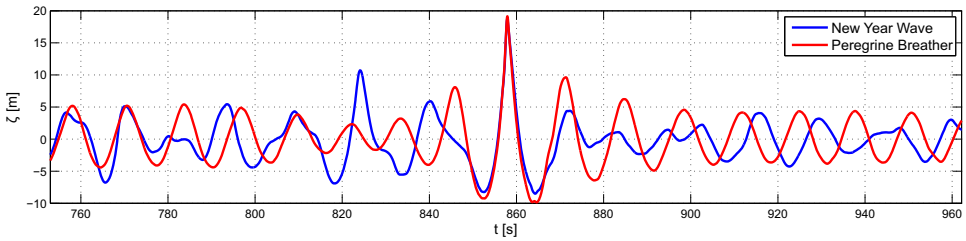

Abbildung 3.3: Vergleich der New Year Wave (blau) mit einem maßgeschneiderten „Peregrine-Breather“ (rot) (modifiziert nach Klein (2015)).

Im Bezug auf die kritischen Norm-Wellengruppen ermöglichen „Peregrine-Breather“ gezielte Analysen kritischer Einzelwellenereignisse, ähnlich denen der New Year Wave. Abbildung 3.3 vergleicht exemplarisch die experimentell gemessenen Wellenzüge eines „Peregrine-Breather“ und der New Year Wave, jeweils zum Zeitpunkt der maximalen Auslenkung. Der Breather weist einen ähnlichen Verlauf der kritischen Einzelwelle mit nahezu identischer Crest-Höhe wie die New Year Wave auf. Darüber hinaus liefert er jedoch auch tiefere vorangehende und nachfolgende Wellentäler bei kürzeren Perioden, was in erhöhter Wellensteilheit und Nichtlinearität resultiert.

„Peregrine-Breather“ werden innerhalb dieser Arbeit für die Ermittlung des Einflusses der Wassertiefe auf die nichtlineare Seegangsvorhersage verwendet.

3.2.2.2 Envelope Solitone

Ein „Envelope Soliton“ ist eine räumlich begrenzte Wellengruppe, deren Hüllkurve sich zeitlich und örtlich nicht ändert (vgl. Abb. 3.4). Die physikalische Grundlage beruht auf dem Wechselspiel zwischen nichtlinearen Welle-Welle-Interaktionen und dem Dispersionsverhalten der beteiligten Wellenkomponenten. Formstabilität[3] herrscht vor, wenn die Wellenkomponenten der Wellengruppe im Gleichgewicht zwischen der zerstörenden Wirkung der Dispersion der Elementarwellen und der stabilisierenden Wirkung der Welle-Welle-Interaktion ist. Dadurch bewegen sich alle Wellenkomponenten mit der Gruppengeschwindigkeit der Hüllkurve fort, wodurch sich die Form der Hüllkurve nicht ändert (Zakharov and Shabat (1971); Benjamin and Feir (1967); Yuen and Lake (1975, 1982); Slunyaev et al. (2013)). Diese Wellengruppen sind dadurch charakterisiert, dass alle Wellen innerhalb der Hüllkurve eine sehr ähnliche Wellenperiode aufweisen, wodurch sich bei ungünstigen Wellenlängen katastrophale Folgen für schwimmende Strukturen ergeben können.

Beispiele für strukturelles Versagen von Schiffen in kritischem Seegang zeigen sich bei Havarien, wie die des mittschiffs zerbrochenen Container-

[3]Form- oder Ausbreitungsstabilität bezeichnet das unveränderte Fortschreiten der Einhüllenden.

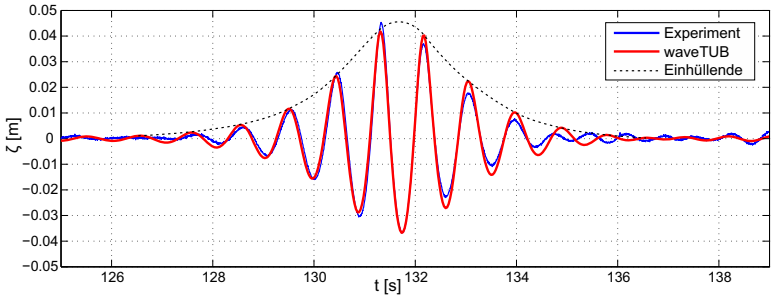

Abbildung 3.4: Abbildung eines stabilen „Envelope Soliton“ – Darstellung der experimentell gemessenen (blau) sowie der mit waveTUB numerisch berechneten Wellengruppe (rot) sowie die Visualisierung ihrer Einhüllenden (schwarz gestrichelt).

schiffs „Mol Comfort“ (17. Juni 2013) oder die letztendlich geborstenen Öltanker „Prestige“ (13. November 2002) und „Erika“ (12. Dezember 1999).

Die analytische „Envelope Soliton“-Lösung der TNLS (Gl. 3.2) beschreibt die örtliche Entwicklung der Einhüllenden im Zeitbereich:

$$A_S(x,t) = a_c \frac{e^{\left(-i\frac{1}{2}a_c^2\beta' x\right)}}{\cosh\left(a_c\sqrt{\frac{\beta'}{2\alpha'}}t\right)}, \tag{3.13}$$

mit a_c als Amplitude der Einhüllenden. Solitone nach Gleichung 3.13 sind prädestiniert für Versuche im Seegangsbecken, da die Einhüllende und somit die Wellengruppe an vordefinierten Orten im Seegangsbecken (z.B. an der Wellenklappe, um das Steuersignal zu berechnen) berechnet werden können.

Ebenso wie „Breather“ können „Envelope Solitone“ hohe Wellensteilheiten erreichen und beim Auftreffen auf eine Struktur dramatische Antworten erzeugen. „Envelope Solitone“ werden im Rahmen dieser Arbeit für die Analyse des Einflusses der Wellensteilheit auf die nichtlineare Seegangsvorhersage verwendet.

3.3 Definition der Einsatzparameter

Die beiden Kernbereiche – Seegangsvorhersage und Bewegungsvorhersage – sollen in den nachfolgenden Abschnitten präsentiert und bewertet werden. Dazu muss – neben den bereits identifizierten kritischen Wellengruppen – ein aussagekräftiges Beispielszenario für die Bewegungsvorhersage gewählt werden, welches wiederum die Einsatzseegänge wesentlich mitbestimmt.

Dazu wird im Folgenden ein Offshore-relevantes Mehrkörper-Beispielszenario im Bereich Offshore-Wind-Operationen definiert. Des Weiteren werden, vor allem mit Fokus auf die Seegangsvorhersage, die wichtigsten Einsatzparameter identifiziert, mit Hilfe derer im Anschluss Validierungsszenarien definiert werden können.

3.3.1 Definition des Beispielszenarios

Anwendungsorientierte Einsatzszenarios für eine Bewegungsvorhersage sind z.B. Offshore-Kranoperationen - hier gilt es kurzfristig geeignete Seegangsfenster zu identifizieren um somit Einsatzzeiten und -kosten der beteiligten Offshore-Strukturen zu minimieren. Als Beispielszenario wird eine Offshore-Kranoperation zwischen einem Kranhalbtaucher und einer Lastenbarge untersucht, wie es beim Errichten von Offshore-Installationen vorkommt. Im Detail wird ein Offshore-Kranszenario zwischen dem Kranhalbtaucher *Thialf*[4] und einer geeignet großen Lastenbarge gewählt. Bei *Thialf* handelt es sich um den weltweit größten Kranhalbtaucher (SSCV – Semi Submersible Crane Vessel) mit einer Hubkapazität von 14.200 t (zwei Tandemkräne à 7.100 t). Das sich gegenseitig beeinflussende, hydrodynamisch gekoppelte Mehrkörpersystem stellt dabei ein anspruchsvolles Einsatzszenario dar.

Operationsvorgang

Eine Offshore-Kranoperation stellt ein anspruchsvolles Szenario dar. Im Allgemeinen sind bei einer Kranoperation auf See, bei der eine Last von einer Transportbarge abgehoben wird, mehrere Phasen zu berücksichtigen:

Zur Vorbereitung der Operation werden alle Strukturen in Position gebracht. Im Anschluss wird, bei geeigneten Seegangsbedingungen, die Last auf der Barge am Kranhaken befestigt (anpicken) und die jeweiligen Transportsicherungen gelöst, wobei die Kranseile lose/lastlos bleiben – das Mehrkörpersystem ist ausschließlich hydrodynamisch gekoppelt. In der nächsten Phase (*point of no return*) werden die Kranseile auf circa 80 % der Last vorgespannt – das Mehrkörpersystem ist nun zusätzlich über die Kranseile mechanisch gekoppelt. Bei geeigneten Seegangsbedingungen wird die Last

[4] SSCV Thialf – http://de.wikipedia.org/wiki/SSCV_Thialf

Tabelle 3.2: Hauptabmessungen des Kranhalbtauchers und der Transport-Barge.

Parameter	Kranhalbtaucher		Transport-Barge	
	Original	Modell (1:75)	Original	Modell (1:75)
Länge	153,8 m	2,051 m	164,8 m	2,197 m
Breite	87,67 m	1,17 m	74,6 m	0,998 m
Tiefgang	27 m	0,36 m	4,9 m	0,065 m
Höhe	49,5 m	0,66 m	15 m	0,2 m
Verdrängung	182.300 m^3	0,432 m^3	54.820 m^3	0,130 m^3

vollständig von der Barge gehoben (*lift-off*). Diese Phase dauert nur wenige Minuten, stellt jedoch – vor allem mit der Last dicht über der Barge – die kritischste Situation der Operation dar. Zum schnellen Anheben der Last wird der Schwimmkran mittels Ballastautomatik (Rapid-Ballast-System) vertrimmt, wodurch die Last innerhalb von $90\,s$ um etwa $4,5\,m$ angehoben wird (Grafoner (1989); Jacobsen (2005)). Zusätzlich können die Kranseile eingeholt werden. Mit der nun frei hängenden Last sind die Strukturen wieder ausschließlich hydrodynamisch gekoppelt – die Barge entfernt sich und der Kranhalbtaucher verholt zum Absetzort. Das Absetzen der Last auf der jeweiligen Offshore-Struktur geschieht analog zum Anheben in umgekehrter Reihenfolge.

Die Konfiguration der beteiligten Strukturen ist in Abbildung 3.5 dargestellt – dabei liegt die Barge leeseitig, quer zum Halbtaucher mit einem Abstand von $15\,m$. Die Dimensionen beider Strukturen sind in Tabelle 3.2 für Original und Modellmaßstab (1:75) aufgeführt.

Ungeachtet des gewählten Beispielszenarios müssen die Einsatzparameter hinsichtlich aller Teilaspekte – Seegangserfassung, Seegangsvorhersage und Bewegungsvorhersage – definiert werden.

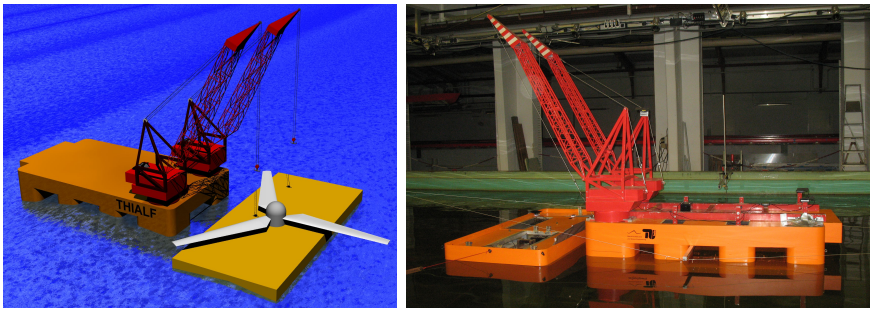

Abbildung 3.5: Darstellung der untersuchten Strukturen - Visualisierung des Anwendungsbeispiels (links) sowie Impression des Versuchsaufbaus während der Modellversuche an der TUB (rechts).

3.3.2 Identifizierung der Einsatzparameter

Für die Identifikation der Einsatzparameter müssen die verschiedenen Aspekte des Bewegungsvorhersagesystems einzeln betrachtet werden. Die drei Teilprogramme weisen unterschiedliche, limitierende Eigenschaften auf. Die Schnittmenge aller bestimmenden und auch beschränkenden Faktoren der drei Teilprogramme ergibt die zu definierenden Einsatzparameter für das Prognoseverfahren.

Zum einen bestimmen die Systembeschränkungen des Radarsystems die Seegangserfassung in Form von minimal detektierbarer Wellenhöhe und maximaler Detektierweite. Die minimal detektierbaren Wellenhöhen des WaMoS® II Systems konnten durch verbesserte Hardware – ein vertikal polarisiertes Radarsystem für erhöhte Sensivität der Datenreflektion (VV-Antennen) – und neue Analysealgorithmen deutlich verbessert werden (Hessner et al. (2015)). Die maximale Detektierweite ist stark witterungsbedingt und liegt bei circa 3 sm.

Zum anderen bestimmen die Seegangseigenschaften die Prognostizierbarkeit des eintreffenden Seegangs (die Gruppengeschwindigkeit beeinflusst den Vorhersagehorizont) wie auch die Systemantworten des gewählten Beispielszenarios. Mit Fokus auf die Ziele dieser Arbeit werden nachfolgend die identifizierten Einsatzparameter hinsichtlich der Seegangs- und Bewegungsvorhersage dargestellt. Abbildung 3.6 (links) stellt exemplarisch einen irregulären Seegang sowie dessen charakteristische Größen (Wellenlänge L, Wellenhöhe H, Wassertiefe d sowie die Wellenamplitude ζ_a) im verwendeten Koordinatensystem dar.

Als die wichtigsten systembeeinflussenden Einsatzparameter sind zunächst die seegangsbestimmenden Größen H_S (signifikante Wellenhöhe) und T_P (Peak-Periode) zu nennen. Beide Parameter erlauben schnelle Rückschlüsse auf das Bewegungsverhalten bzw. die Einsatzfähigkeit schwimmen-

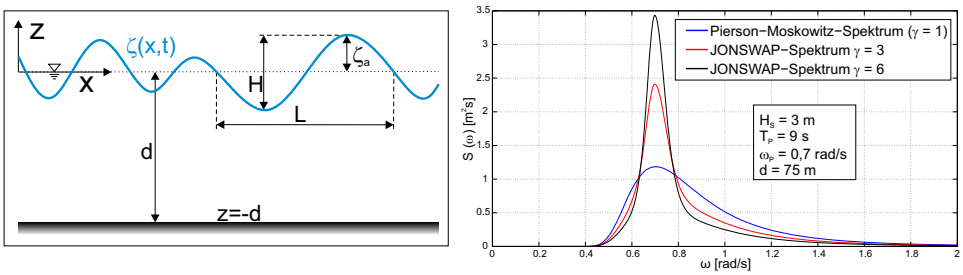

Abbildung 3.6: Links: Definition des Koordinatensystems mit exemplarischer Darstellung eines irregulären Seegangs sowie dessen charakteristische Größen. Rechts: Veranschaulichung des Formfaktoreinflusses bei Seegangsspektren gleicher Peak-Periode und signifikanter Wellenhöhe.

der Strukturen und werden mittels stochastischer Methoden für die Planung von Offshore-Operationen verwendet. Für die Teilprogramme Seegangs- und Bewegungsvorhersage ist insbesondere das Verhältnis von Wellenhöhe und Periode relevant, da hieraus die Steilheit ϵ des Seegangs

$$\epsilon = \frac{d\zeta}{dx} = \underbrace{k\zeta_a = \frac{2\pi^2}{g} \cdot \frac{H}{T^2}}_{\text{harmonische Wellen}} \xrightarrow{spektral} \underbrace{\frac{2\pi^2}{g} \cdot \frac{H_S}{T_P^2}}_{\text{irregulärer Seegang}} \tag{3.14}$$

abgeschätzt werden kann (vgl. Kjeldsen (1990)). Die Steilheit wiederum kann als direktes Maß für die Nichtlinearität des Seegangs verwendet werden. Nichtlinearität bezieht sich in diesem Kontext auf das Ausbreitungsverhalten der Wellen hinsichtlich Welle-Welle-Interaktion und Wellen- bzw. Gruppengeschwindigkeit. Beides muss von der Seegangsvorhersage möglichst exakt modelliert werden, um eine zuverlässige Vorhersage zu gewährleisten. Allerdings wird, aufgrund der Anforderung der geringen Berechnungsdauer und der damit zusammenhängenden, notwendigen Vereinfachung der Wellengleichungen, die Genauigkeit des Systems von diesem Parameter stark beeinflusst. Für die Bewegungsvorhersage kann der Einfluss der Steilheit nicht berücksichtigt werden, da die Bewegung auf Grundlage linearer RAOs ermittelt wird.

Ein weiterer wichtiger Parameter, welcher Rückschlüsse auf die Nichtlinearität des Seegangs zulässt, ist der Form- bzw. Vergrößerungsfaktor γ. Der Formfaktor charakterisiert die Überhöhung des Peaks des jeweiligen Seegangsspektrums im Vergleich zu einem (Standard) Pierson-Moskowitz-Spektrum ($\gamma = 1$). Je größer γ, desto schmalbandiger ist der Seegang (vgl. Abb. 3.6, rechts). Ein hohes γ führt daher zu einem Seegang, in dem die Peak-Periode dominiert und sich dadurch Wellengruppen ähnlicher Form und Geschwindigkeit ausbilden. Insbesondere diese Wellengruppen, welche in einem Seegang mit hohem γ vermehrt vorkommen, sind potentiell gefährliche Wellensequenzen. Diese kritischen Wellengruppen können die Strukturen im ungünstigen Resonanzbereich anregen und müssen daher frühzeitig identifiziert werden. Außerdem können solche Wellengruppen mit ähnlichen Wellenlängen aufgrund der Benjamin-Feir-Instabilität zu Extremwellen heranwachsen.

Die Wassertiefe d – bzw. die relative Wassertiefe $k \cdot d$ – ist ein ebenso wichtiger Parameter, welcher beide Teilprogramme signifikant beeinflusst. Mit abnehmender Wassertiefe wird das Ausbreitungsverhalten von Wellen hinsichtlich Wellenlänge, Wellen- bzw. Gruppengeschwindigkeit und Welle-Welle-Interaktion im Vergleich zu Tiefwasser signifikant verändert. Zeitgleich ändert sich auch das Bewegungsverhalten, da Dämpfung und hydrodynamische Massen des Systems beeinflusst werden. Insbesondere aufgrund der Tatsache, dass die Offshore-Windenergieanlagen hauptsächlich in moderaten Wassertiefen installiert werden, muss sichergestellt werden, dass die

beiden Teilprogramme den Einfluss der Wassertiefe genau erfassen und wiedergeben können.

Sowohl die allgemeine Funktionalität als auch die Qualität der numerischen Simulation werden mit der NLS-Gleichung sowie der HOSM untersucht. Die sogenannten „Breather“ und „Envelope Soliton“ Lösungen stellen kritische Norm-Wellengruppen dar, mit denen die numerische Vorhersage bezüglich nichtlinearer Wellengruppenphänomene untersucht werden kann. Beide Lösungen sind prädestiniert, um das Leistungsvermögen der jeweiligen numerischen Vorhersagemethode zu untersuchen und zu bewerten. Durch Variation der Anfangssteilheit und der relativen Wassertiefe kann die Bandbreite der Anwendbarkeit evaluiert werden.

Die identifizierten Einsatzparameter orientieren sich an den seegangsbestimmenden Größen von irregulären Seegängen, da diese den natürlichen Seegang realistisch abbilden. Damit wird gewährleistet, dass die nachfolgenden Validierungsparameter und die daraus folgenden Einsatzbereiche direkt für eine spätere Anwendung übernommen werden können.

Für die Bestimmung der Einsatzbereiche werden die identifizierten Einsatzparameter (H_S, T_P, γ und ϵ) durch gezielte Variation zur Generierung vordefinierter, irregulärer Seegänge verwendet. Folgende Validierungsbereiche (Originalmaßstab) werden untersucht:

$$0,25\,m \leq H_S \leq 10\,m \tag{3.15}$$

$$3\,s \leq T_P \leq 15\,s \tag{3.16}$$

Die Maximalwerte der signifikanten Wellenhöhen liegen weit über dem von der Industrie geforderten Bereich ($H_S \leq 2,5\,m$) und sollen lediglich die Einsatzfähigkeit und -grenzen des Systems aufzeigen. Wichtige Seegangseigenschaften hinsichtlich der zu erwartenden Nichtlinearitäten werden über die Größen γ (Formfaktor) und ϵ (Wellensteilheit) in folgendem Rahmen erfasst:

$$1 \leq \gamma \leq 6,0 \tag{3.17}$$

$$0 < \epsilon \leq 0,3 \tag{3.18}$$

Die gewählten Grenzen gehen von moderaten Bedingungen bis zu sehr schmalbandigen bzw. steilen Seegängen. Ein weiterer Faktor für nichtlineare Einflüsse ist die begrenzende Wassertiefe d, welche bei der Validierung der Teilprogramme berücksichtigt wird.

3.3.3 Auswahl der Evaluationsseegänge

Auf Basis der zuvor identifizierten Einsatzparameter sollen im Folgenden die Seegänge für die anschließenden Analysen festgelegt werden.

Definition der Solitone

Tabelle 3.3 fasst die Eigenschaften der drei zu analysierenden „Envelope Solitone“ zusammen, welche den Einfluss der Wellensteilheit – $k_0 \cdot A_0 = \epsilon_0 = [0,15;\ 0,23;\ 0,3]$ – auf die nichtlineare Seegangsvorhersage quantifizieren sollen.

Tabelle 3.3: Eigenschaften der untersuchten „Envelope Solitone“ (Modellmaßstab).

Nr.	$k_0 \cdot A_0$ [-]	ω_0 $[rad/s]$	$k_0 \cdot d$ [-]
S1	0,15	6,86	4,80
S2	0,23	6,86	4,820
S3	0,30	6,82	4,74

Definition der Breather

Tabelle 3.4 fasst die Eigenschaften der drei zu analysierenden „Peregrine-Breather“ zusammen, welche den Einfluss der Wassertiefe – $d = [1\,m; 2\,m; 4\,m]$ (Modellmaßstab) – auf die nichtlineare Seegangsvorhersage quantifizieren sollen.

Tabelle 3.4: Eigenschaften der untersuchten „Peregrine-Breather“ (Modellmaßstab).

Nr.	d [m]	$k_0 \cdot A_0$ [-]	ω_0 $[rad/s]$	$k_0 \cdot d$ [-]
B1	4	0,075	4,48	8,20
B2	2	0,075	4,48	4,10
B3	1	0,075	4,48	2,05

Aus den Lokationen $x_{\zeta_{max}}$ der maximalen temporären Amplifizierung ζ_{max} geht hervor, dass die Validierung ausschließlich durch den numerischen Wellenkanal waveTUB zu realisieren ist. Die benötigten Propagationsweiten für maximale temporäre Amplituden nimmt mit abnehmender Wassertiefe stark zu, was die experimentelle Validierung ausschließt.

Definition der irregulären Seegänge

Tabelle 3.5 fasst die Eigenschaften der zu analysierenden irregulären Seegänge – im Originalmaßstab (Full Scale) – zusammen. Hierbei wurden die zuvor identifizierten kritischen Parameter – γ und ϵ – bei gleicher Phasenlage der einzelnen Seegänge variiert. Dies bedeutet, dass alle untersuchten irregulären Seegänge eine zufällige, jedoch identische Phasenlage besitzen, was einen direkten Vergleich sowie die Auswertung innerhalb der nachfolgenden Analysen begünstigt.

Tabelle 3.5: Überblick über die im Zeitbereich untersuchten irregulären Seegänge (Originalmaßstab).

Nr.	T_P	kd	H_S	ϵ	γ
1	**8,58s**	**4,1**	**1,83m**	**0,05**	**1**
2					**3**
3					6
4			**3,66m**	**0,10**	**1**
5					3
6			$5,48m$	$0,15$	1
7					3
8					6
9	**13,5s**	**1,75**	**4,25**m	**0,05**	1
10					**3**
11					6
12			**8,5**m	**0,10**	1
13					**3**
14					6

Im Rahmen der nachfolgenden Analysen werden die Seegänge 1, 2 und 5 (fett hervorgehoben) exemplarisch im Zeitbereich untersucht, um den Einfluss der Wellensteilheit ϵ sowie der spektralen Bandbreite γ zu veranschaulichen. Für die Analysen im Ortsbereich werden zusätzlich die Seegänge 10 und 13 ausgewertet, um den Einfluss der dominierenden Wellenperiode T_P sowie der Steilheit ϵ zu verdeutlichen. Für die globale Analyse werden alle aufgeführten Seegänge analysiert und anhand der eingeführten Gütekriterien bewertet, jedoch nicht grafisch visualisiert.

3.4 Seegangsvorhersage

Das übergeordnete Ziel der Seegangsvorhersage ist die Implementierung eines sehr schnellen, numerischen Verfahrens zur Seegangsbeschreibung bei gleichzeitiger, höchstmöglicher Genauigkeit[5].

Dies ist notwendig um sicherzustellen, dass die berechnete Seegangsvorhersage am Ort der Struktur einen signifikanten Zeitraum vor Eintreffen der realen Wellen zur Verfügung steht. Die Anforderung an Schnelligkeit kann sowohl von der NLS-Gleichung ($\leq 5\,s$[6] bzw. $1-2\%$ T_{Prog}[7]) als auch von der HOSM ($20-30\,s$[5] bzw. $8-12\%$ T_{Prog}) erfüllt werden (vgl. Kap. 3.1). Die Genauigkeit gilt es nachfolgend mittels kritischer Normwellengruppen und repräsentativer irregulärer Beispielseegänge zu evaluieren. Ein wichtiger Teilschritt ist dabei die experimentelle Analyse und Validierung der implementierten numerischen Verfahren in der kontrollierbaren Umgebung eines Seegangsbeckens. Die Validierung unterteilt sich in zwei Hauptuntersuchungsgebiete – im Zeitbereich (TNLS) und im Ortsbereich (ONLS und HOSM) – entsprechend der beiden implementierten Varianten der NLS-Gleichung.

Validierung der numerischen Methoden

Dieses Kapitel adressiert die experimentelle sowie numerische Validierung der implementierten Verfahren im Seegangsbecken bzw. mit Hilfe des numerischen Referenzverfahrens waveTUB. Die Validierung unterteilt sich dabei in Untersuchungen

- im ***Zeitbereich*** (siehe Kapitel 3.4.1) sowie
- im ***Ortsbereich*** (siehe Kapitel 3.4.2).

In einem ersten Schritt wird die TNLS verwendet, um die grundsätzliche Funktionsfähigkeit und die Einsatzgrenzen der NLS-Gleichung zu verifizieren. Die TNLS ermöglicht dabei eine einfache und schnelle Validierung, da die gemessenen Registrierungen an vordefinierten Orten im Seegangsbecken direkt verwendet werden können.

Im zweiten Schritt werden Untersuchungen im Ortsbereich durchgeführt, um die für die entwickelte Vorhersage benötigte zeitliche Entwicklung eines Wellenbildes im Ortsbereich zu validieren. Um die eigentlich notwendigen und aufwändigen Messungen im Ortsbereich (sukzessive Messung von Registrierungen entlang des Kanals) signifikant zu reduzieren, wird ein semi-experimenteller Ansatz für die Validierung verwendet. Bei den Ortsbereichsuntersuchungen wird sowohl die ONLS als auch die HOSM (benötigt das

[5] Akkurate Vorhersage unter Berücksichtigung nichtlinearer Welle-Welle-Interaktionen.
[6] bezogen auf einen exemplarischen Prognosezeitraum von $240\,s$.
[7] Prognosezeitraum T_{Prog} [s]

örtliche Wellenbild als Input → reine Zeitbereichsuntersuchungen sind daher nicht möglich) intensiv untersucht.

Die im Nachfolgenden präsentierten Modellversuche sind im Seegangsbecken der TU Berlin durchgeführt worden. Das Becken hat eine Länge von $120\,m$, eine Breite von $8\,m$ und eine Wassertiefe von $1\,m$. Der Modellmaßstab ist 1:75. Der Versuchsaufbau besteht bei allen Versuchen aus mehreren Wellenpegeln, welche entlang des Seegangsbeckens installiert sind, wodurch die (nichtlineare) Wellenausbreitung entlang des Kanals erfasst werden kann. Anzahl und Position der Wellenpegel variieren je nach untersuchter Fragestellung und werden in den folgenden Unterabschnitten benannt.

3.4.1 Untersuchung im Zeitbereich

Die Untersuchungen im Zeitbereich (wie auch im Ortsbereich) unterteilen sich jeweils in drei Abschnitte. Zunächst wird mit Hilfe der kritischen Normwellengruppen der Einfluss der Wellensteilheit (Solitone) sowie der relativen Wassertiefe (Breather) auf die Güte der nichtlinearen Simulation analysiert. Anschließend werden die durch gezielte Variation der identifizierten Einsatzparameter generierten, irregulären Seegänge analysiert und validiert. Als Validierungsgrundlagen dienen, je nach Szenario, die experimentellen Ergebnisse sowie die numerischen Referenzergebnisse der waveTUB Simulationen.

3.4.1.1 Envelope Solitone

Das Ziel der Soliton-Analysen ist, neben der Untersuchung nichtlinearer Wellengruppenphänomene, die Evaluierung des Einflusses der Wellensteilheit auf die Güte der nichtlinearen Simulation. Mit zunehmender Wellensteilheit nimmt der Einfluss nichtlinearer Welle-Welle-Interaktionen auf die Wellenausbreitung signifikant zu. Insgesamt werden drei „Envelope Solitone“ unterschiedlicher Steilheit bei konstanter Trägerfrequenz untersucht – von moderater Steilheit bis zu sehr steilen Wellengruppen ($\epsilon_0 = [0,15;\ 0,23;\ 0,3]$, vgl. Tab. 3.3).

Der Versuchsaufbau besteht dabei aus insgesamt 10 Wellenpegeln, wobei für die nachfolgende Validierung nur der erste Pegel bei $x = 10\,m$ und der letzte Pegel bei $x = 85\,m$ verwendet werden. Als Input für die Simulation dient die im Seegangsbecken dicht am Wellenblatt gemessene Wasserspiegelauslenkung ($x = 10\,m$). Die gemessene Wasserspiegelauslenkung weit entfernt vom Wellenblatt ($x = 85\,m$) wird anschließend als Referenz für die Validierung der numerischen Simulation verwendet.

Abbildung 3.7 präsentiert die Ergebnisse dieser Untersuchung für die drei analysierten Wellensteilheiten. Die Abbildung setzt sich dabei aus drei Teilabbildungen (schwarze Rahmen) der untersuchten Wellengruppen zusammen, welche sich jeweils wie folgt gliedern: Das obere Diagramm zeigt

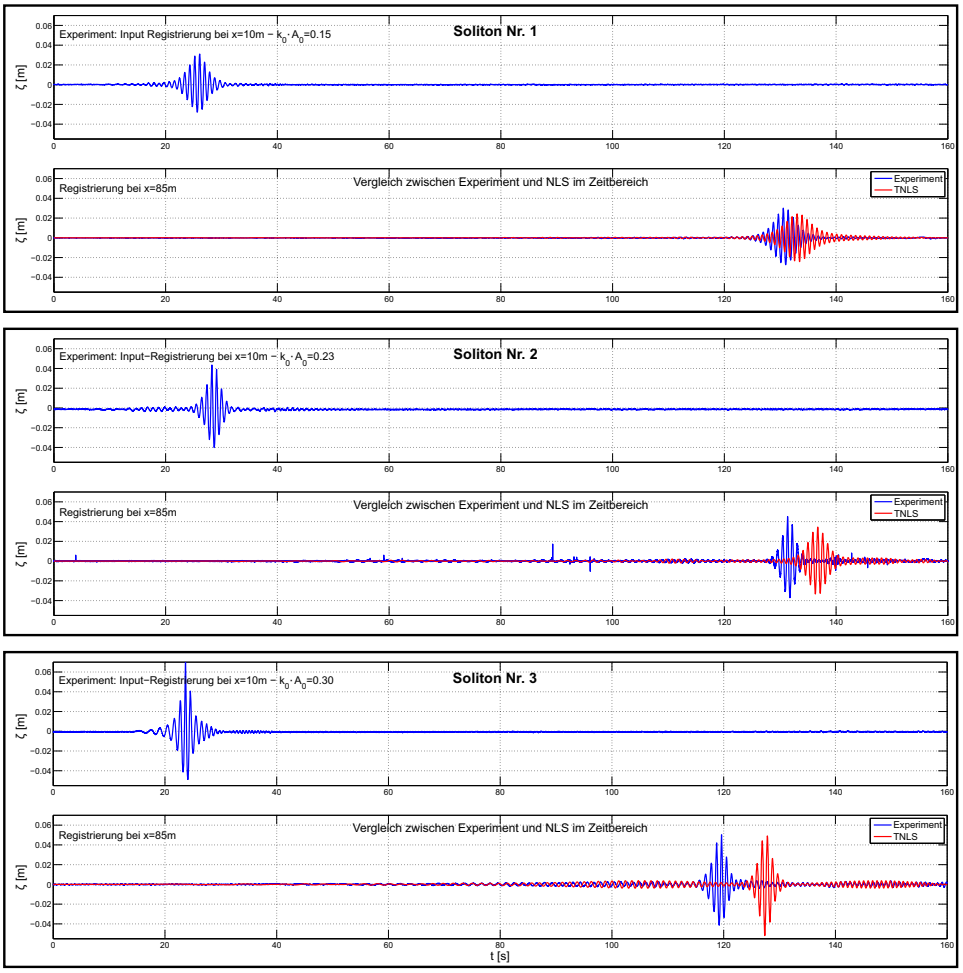

Abbildung 3.7: Wellenausbreitung der drei „Envelope Solitone“ mit moderater (oberer Rahmen – $k_0A_0 = 0,15$), mittlerer (mittlerer Rahmen – $k_0A_0 = 0,23$) und hoher Steilheit (unterer Rahmen – $k_0A_0 = 0,30$). Dabei ist je Steilheit (Rahmen) dargestellt: die experimentell gemessene Wellensequenz, welche als Input für die Simulationen verwendet wird (oben), und die TNLS-Simulation bei $x = 85\,m$ im Vergleich mit der experimentell gemessenen Wellensequenz (unten).

die gemessene Input-Wasserspiegelauslenkung ($x = 10\,m$), welche als Eingangssignal für die NLS-Simulation verwendet wird. Das untere Diagramm vergleicht die an der Ziellokation ($x = 85\,m$) experimentell gemessene Wellengruppe mit der TNLS-Simulation.

Die Abbildung macht deutlich, dass die nichtlineare Wellenausbreitung mit der TNLS-Simulation hinreichend genau beschrieben werden kann. Allerdings nimmt, auf Grund der Tatsache dass die NLS-Gleichung auf der linearen Dispersionsgleichung beruht, der zeitliche Versatz zwischen Experiment und NLS-Simulation mit zunehmender Wellensteilheit zu.

3.4.1.2 Peregrine Breather

Das Ziel der Breather-Analysen ist, neben der Untersuchung nichtlinearer Wellengruppenphänomene, die Analyse des Wassertiefeneinflusses auf die Güte der nichtlinearen Simulation. Mit abnehmender (relativer) Wassertiefe nimmt der Einfluss auf die Wellenausbreitung signifikant zu, was im Falle der „Peregrine-Breather“ in einer erhöhten Distanz bis zum Erreichen der maximalen Wellenhöhe resultiert.

Dieser Effekt wird ausgenutzt, um die Funktionsfähigkeit des implementierten Programms hinsichtlich der korrekten Wiedergabe des Wassertiefeneinflusses zu untersuchen. Innerhalb der analysierten „Peregrine-Breather“ verdoppelt sich diese Distanz, wenn die Wassertiefe von $d = 4\,m$ auf $d = 1\,m$ herabgesetzt wird.

Da sowohl die variablen Wassertiefen als auch die notwendige Wellenkanallänge in der Versuchseinrichtung nicht verfügbar sind, wird die nachfolgende Untersuchung ausschließlich mit dem numerischen, nichtlinearen Wellenkanal waveTUB validiert. Dieser ermöglicht die Untersuchung beliebiger Wellenkanalkonfigurationen. Für die Untersuchung wird dieselbe Wasserpiegelauslenkung am numerischen Wellenblatt in den drei verschiedenen Wassertiefen simuliert ($d = [1\,m; 2\,m; 4\,m]$, vgl. Tab. 3.4), und die Registrierungen nah am (numerischen) Wellenblatt (Input für die NLS-Simulation; $x = 10\,m$) sowie am Ort der maximalen Wellenerhebung (Referenz für Validierung; $x = 164\,m$ für $d = 4\,m$, $x = 207\,m$ für $d = 2\,m$ und $x = 411\,m$ für $d = 1\,m$) verwendet.

Abbildung 3.8 präsentiert die Ergebnisse dieser numerischen Untersuchung für die drei unterschiedlichen Wassertiefen (drei schwarze Rahmen). Die drei Teilabbildungen sind dabei jeweils wie folgt arrangiert: Das obere Diagramm zeigt die im numerischen Wellenkanal simulierte Input-Wasserspiegelauslenkung ($x = 10\,m$) und das untere Diagramm vergleicht diese Referenz-Wasserspiegelauslenkung mit der TNLS-Simulation.

Die Abbildung verdeutlicht, dass die nichtlineare Wellenausbreitung mit der NLS-Simulation hinreichend genau beschrieben werden kann. Wie bereits erwähnt zeigt sich auch hier, dass die NLS-Gleichung aufgrund der linearen Dispersionsgleichung einen zeitlichen Versatz zur voll nichtlinearen Simulation mittels waveTUB aufweist. Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass die Übereinstimmung zwischen der voll nichtlinearen Simulation und der NLS-Simulation vielversprechend ist, insbesondere hinsichtlich der großen Propagationsweite der simulierten Wellengruppen. Darüber hinaus konnte der Wassertiefeneinfluss – und die damit verbundenen nichtlinearen Welle-Welle-Interaktionen – korrekt wiedergegeben werden.

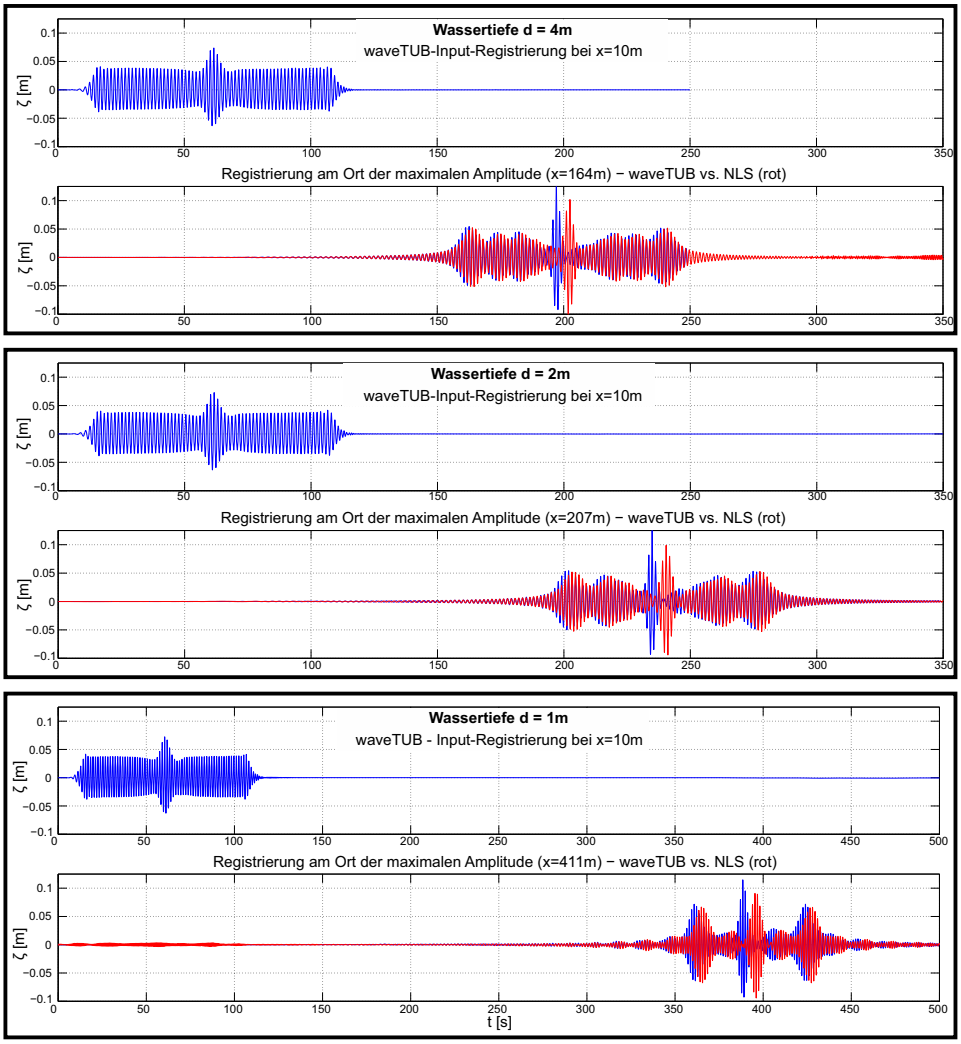

Abbildung 3.8: Wellenausbreitung der drei „Peregrine-Breather“ bei $d = 4\,m$ (oberer Kasten), $d = 2\,m$ (mittlerer Kasten) und $d = 1\,m$ (unterer Kasten). Die Teilabbildungen gliedern sich dabei wie folgt: das obere Diagramm zeigt die im numerischen Wellenkanal simulierte Input-Wasserspiegelauslenkung, das untere vergleicht die waveTUB-Simulation mit der TNLS-Simulation am Ort der maximalen Wellenerhebung.

3.4.1.3 Irreguläre Seegänge

Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der implementierten Methode zur numerischen Lösung der TNLS wurde gezeigt. Der nächste Schritt ist die systematische Untersuchung von natürlichen, irregulären Seegängen, um die Einsatzgrenzen der NLS-Gleichung zu ermitteln. Dafür wird eine Vielzahl verschiedener, irregulärer Seegänge im Wellenkanal der TU Berlin generiert und mittels der TNLS untersucht. Der Fokus der Untersuchung liegt da-

bei auf der Variation der Wellensteilheit, der relativen Wassertiefe und der spektralen Bandbreite (siehe Abschnitt 3.3.2). Tabelle 3.5 präsentiert die Parameter der untersuchten Seegänge mit der signifikanten Wellenhöhe H_S, der Peak-Periode T_P, dem Vergrößerungsfaktor γ, der Wellensteilheit ϵ und der relativen Wassertiefe $k \cdot d$. Exemplarisch werden nachfolgend die drei irregulären Seegänge Nr.1, 2 und 5 (fett gedruckt) evaluiert. Alle nachfolgend gezeigten Ergebnisse sind, im Gegensatz zu den zuvor analysierten kritischen Normwellengruppen, in den Originalmaßstab hoch skaliert.

Die Abbildungen 3.9 - 3.11 stellen die Ergebnisse dieser Experimente für alle Pegelpositionen grafisch dar. Die Abbildungen präsentieren den Vergleich zwischen der numerischen Simulation mittels TNLS und den experimentell gemessenen Wasserspiegelauslenkungen im Wellenkanal für die o.g.

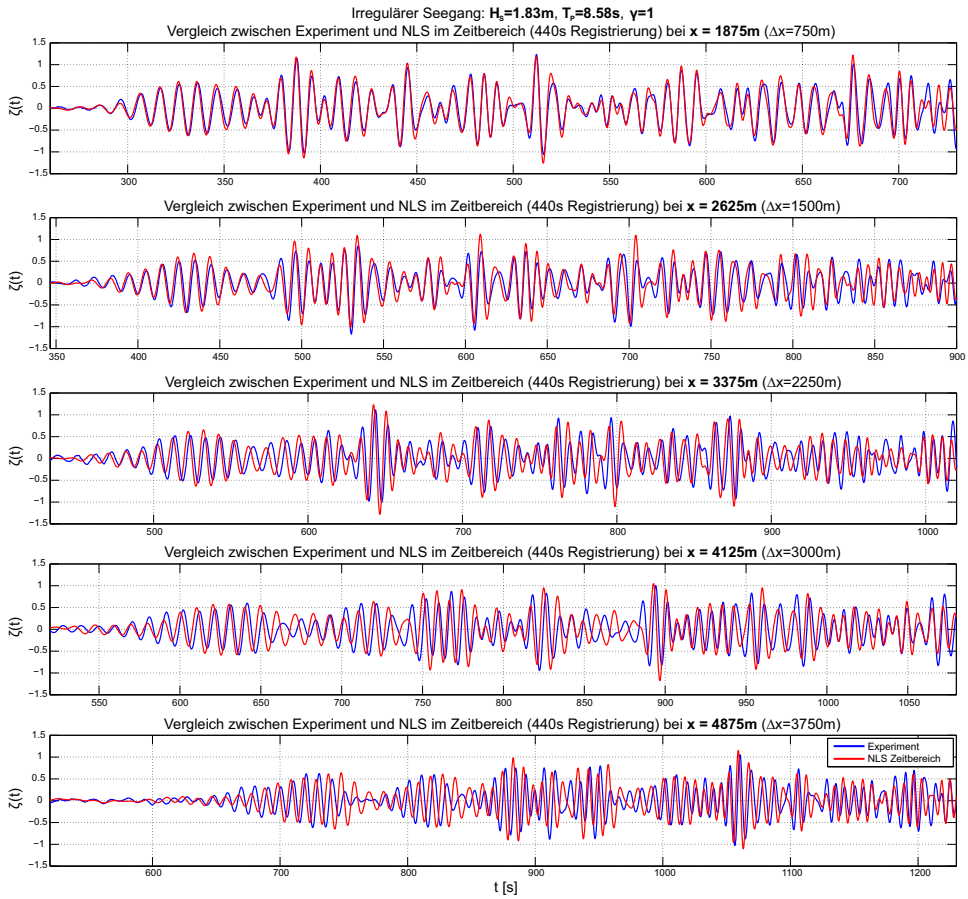

Abbildung 3.9: Experimentelle Validierung der TNLS: Vergleich zwischen der numerischen Simulation und den gemessenen Wasserspiegelauslenkungen des irregulären Seegangs Nr.1 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 1,83\,m$, $\gamma = 1$, $\epsilon = 0,05$) entlang des Wellenkanals ($x_i = 1875\,m; 2625\,m; 3375\,m; 4125\,m; 4875\,m$).

irregulären Seegänge. Dabei werden für jeden untersuchten Seegang verschiedene Orte entlang der Wellenlaufrichtung mit der NLS-Simulation verglichen, wobei der Startpunkt der Simulation identisch ist (d.h. die Simulationsdauer bzw. Simulationslänge wird variiert).

Der Versuchsaufbau besteht aus sechs Wellenpegeln, der erste Pegel ist bei $x = 15\,m$ vor dem Wellenblatt installiert und der Abstand zwischen den Pegeln ist $\Delta x = 10\,m$ – die resultierenden fünf Pegelpositionen ergeben sich zu $x_i = 1875\,m$, $2625\,m$, $3375\,m$, $4125\,m$ und $4875\,m$ im Originalmaßstab. Als Input für die Simulation dient die im Seegangsbecken dicht am Wellenblatt experimentell gemessene Wasserspiegelauslenkung ($x = 15\,m$). Die örtlich nachfolgend gemessenen Wasserspiegelauslenkungen werden als Referenz für die Validierung der numerischen Simulation verwendet.

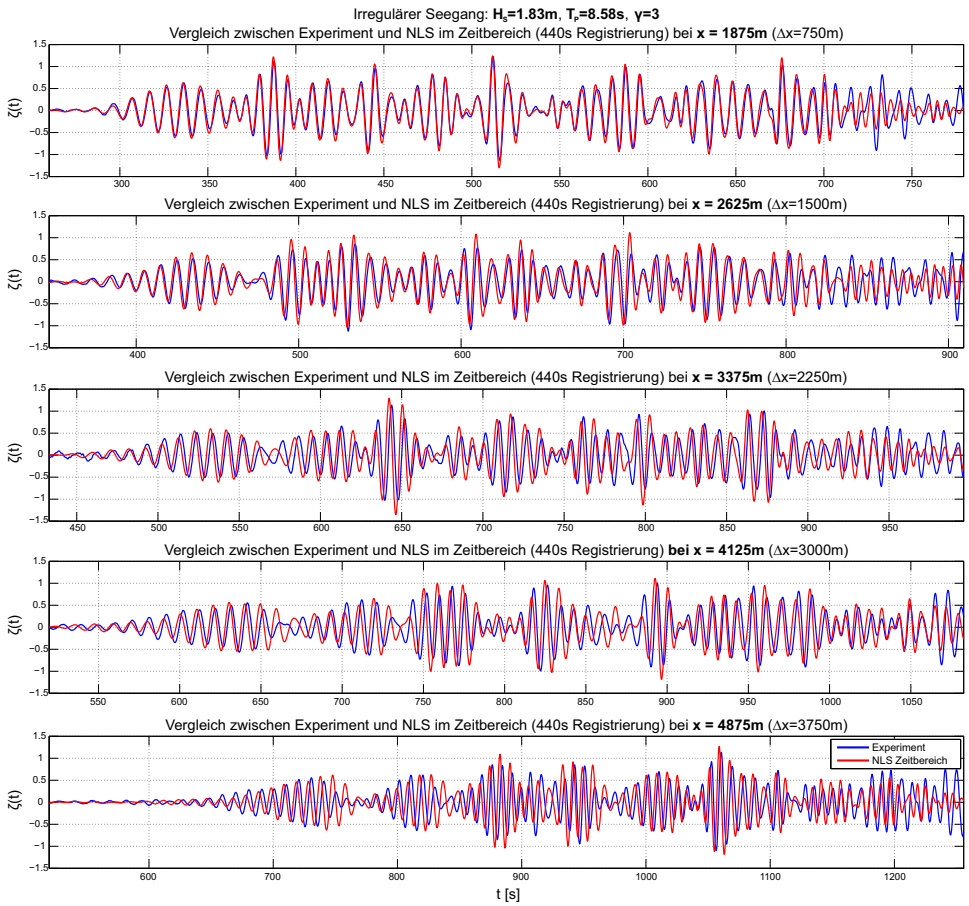

Abbildung 3.10: Experimentelle Validierung der TNLS: Vergleich zwischen der numerischen Simulation und den gemessenen Wasserspiegelauslenkungen des irregulären Seegangs Nr.2 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 1,83\,m$, $\gamma = 3$, $\epsilon = 0,05$) entlang des Wellenkanals ($x_i = 1875\,m; 2625\,m; 3375\,m; 4125\,m; 4875\,m$).

Die ersten beiden Abbildungen (3.9 und 3.10) zeigen Seegänge mit geringer Steilheit ($\epsilon = 0,05$) und nur der Vergrößerungsfaktor γ des JONSWAP Spektrums erhöht sich von $\gamma = 1$ auf $\gamma = 3$. Anhand dieser beiden Abbildungen kann man erkennen, dass die Breitbandigkeit des untersuchten Spektrums von nebensächlicher Bedeutung ist. In beiden Fällen ist die Qualität der Vorhersage vergleichbar gut (der Vorhersagezeitraum beträgt ungefähr 7 Minuten). Anhand von Abbildung 3.11 zeigt sich jedoch, dass bei steileren Seegängen sowohl die Vorhersagequalität als auch die Vorhersagedistanz abnimmt – sowohl bei den individuellen Wellenhöhen als auch bei den Phasenlagen. Dies ist mit den vereinfachenden Annahmen der NLS-Gleichung zu begründen – Gültigkeit für kleine Wellenhöhen, schmalbandige Seegänge und konstante Ausbreitungsgeschwindigkeiten basierend auf linearer Theorie.

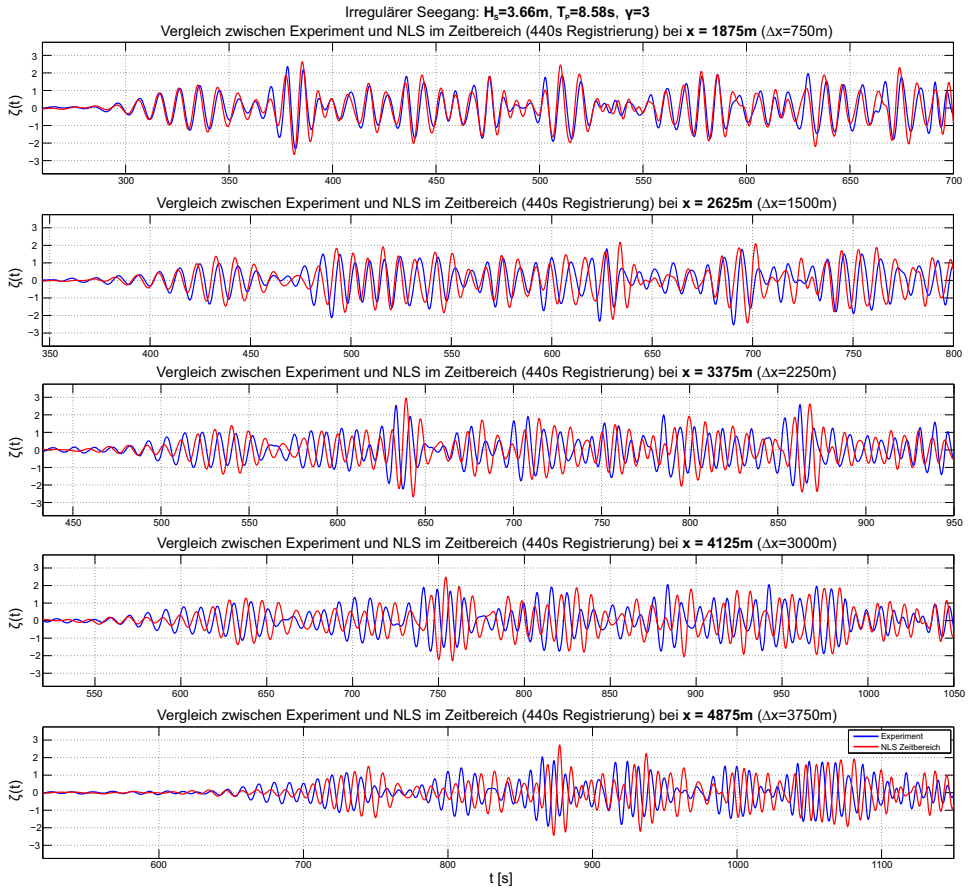

Abbildung 3.11: Experimentelle Validierung der TNLS: Vergleich zwischen der numerischen Simulation und den gemessenen Wasserspiegelauslenkungen des irregulären Seegangs Nr.5 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 3,66\,m$, $\gamma = 3$, $\epsilon = 0,1$) entlang des Wellenkanals ($x_i = 1875\,m; 2625\,m; 3375\,m; 4125\,m; 4875\,m$).

Die drei Abbildungen zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die NLS-Gleichung für moderate Seegänge gute Ergebnisse liefert, jedoch für steilere Seegänge zu ungenau ist. Der Einsatzgrenzwert kann dabei mit einer Steilheit von $\epsilon \approx 0,05$ identifiziert werden. Wie bereits erwähnt, spielt der Formfaktor γ des jeweiligen Seegangsspektrums eine untergeordnete Rolle. Sowohl die Vorhersagedauer ($\approx 7\,min$ im gezeigten Beispiel, jedoch abhängig von der dominierenden Wellenlänge des Seegangs) als auch Vorhersagedistanz ($\approx 3.000\,m$) sind ausreichend für das geplante Vorhersagesystem.

3.4.2 Untersuchung im Ortsbereich

Die grundsätzliche Anwendbarkeit der NLS-Gleichung (im Zeitbereich) ist im vorherigen Abschnitt (Kap. 3.4.1) dargestellt worden und die Einsatzgrenzen sind identifiziert. Darauf aufbauend werden Untersuchungen im Ortsbereich durchgeführt, um die für die entwickelte Vorhersage benötigte zeitliche Entwicklung eines Wellenbildes im Ortsbereich zu validieren. Hierfür wird sowohl die ONLS als auch die HOSM implementiert und evaluiert.

Analog zu den Analysen im Zeitbereich unterteilen sich die Analysen im Ortsbereich jeweils in drei Abschnitte. Zunächst wird mit Hilfe der kritischen Normwellengruppen der Einfluss der Wellensteilheit (Solitone) sowie der relativen Wassertiefe (Breather) auf die Güte der nichtlinearen Simulation analysiert. Nachfolgend werden die durch gezielte Variation der identifizierten Einsatzparameter generierten, irregulären Seegänge analysiert und validiert. Als Validierungsgrundlagen dienen, je nach Szenario, die experimentellen Ergebnisse sowie die numerischen Referenzergebnisse der waveTUB Simulationen.

Untersuchungen im Ortsbereich benötigen am Anfang der Simulation einen räumlichen Schnappschuss der Wasserspiegelauslenkung ($\zeta(x)$), was z.B. der Datenextrapolation des verwendeten, radarbasierten Seegangserfassungssystems entspricht. Dies erschwert jedoch die experimentelle Validierung, da jeder Seegang erst aufwändig im Ortsbereich (sukzessive Messungen entlang des Kanals) gemessen werden müsste. Dabei wird sowohl eine hohe örtliche Auflösung (sehr kleine Abstände zwischen zwei Messpositionen) als auch eine hohe räumliche Ausdehnung (große Wellenbildlänge) benötigt, wodurch sehr viele Messungen pro Seegang im Wellenkanal nötig wären. Um die Anzahl der benötigten Messungen so gering wie möglich zu halten, wird ein semi-experimenteller Ansatz für die Validierungsszenarien gewählt. Für die Ermittlung der benötigten Wellenbilder wird der nichtlineare, numerische Wellenkanal waveTUB verwendet. Das so ermittelte (numerische) Wellenbild, welches an ausgewählten Orten mit experimentellen Registrierungen validiert wird, dient als Input für die Simulationen im Ortsbereich. Details zu den einzelnen Validierungsprozessen werden nachfolgend in den relevanten Abschnitten aufgeführt.

3.4.2.1 Envelope Solitone

Art und Umfang der nachfolgenden Untersuchung sind identisch mit dem Validierungsszenario für die Evaluierung der TNLS. Es werden die in Tabelle 3.3 aufgeführten „Envelope Solitone“ mit unterschiedlicher Wellensteilheit untersucht – von moderater Steilheit ($\epsilon_0 = k_0 A_0 = 0,15$) bis zur sehr steilen Wellengruppe ($\epsilon_0 = 0,3$).

Die Input-Wellenbilder für die NLS- und HOSM-Simulationen werden mit Hilfe des numerischen Wellenkanals waveTUB erzeugt. Die darauf basierenden Simulationen mittels ONLS und HOSM werden zusätzlich mit experimentellen Versuchsergebnissen weit entfernt vom Wellenblatt ($x = 85\,m$) verglichen.

Die Abbildungen 3.12 - 3.14 präsentieren die Ergebnisse für die drei analysierten Wellensteilheiten. Die Abbildungen setzen sich dabei jeweils wie folgt zusammen: Das obere Diagramm präsentiert den mit waveTUB generierten Input-Wellenzug nahe am Wellenblatt ($x = 10\,m$), das mittlere Diagramm vergleicht die gemessene Wasserspiegelauslenkung mit der ONLS-Simulation und das untere Diagramm vergleicht die gemessene Wasserspiegelauslenkung mit der HOSM-Simulation. Die Validierung geschieht dabei jeweils weit entfernt vom Wellenblatt ($x = 85\,m$) und transformiert in den Zeitbereich.

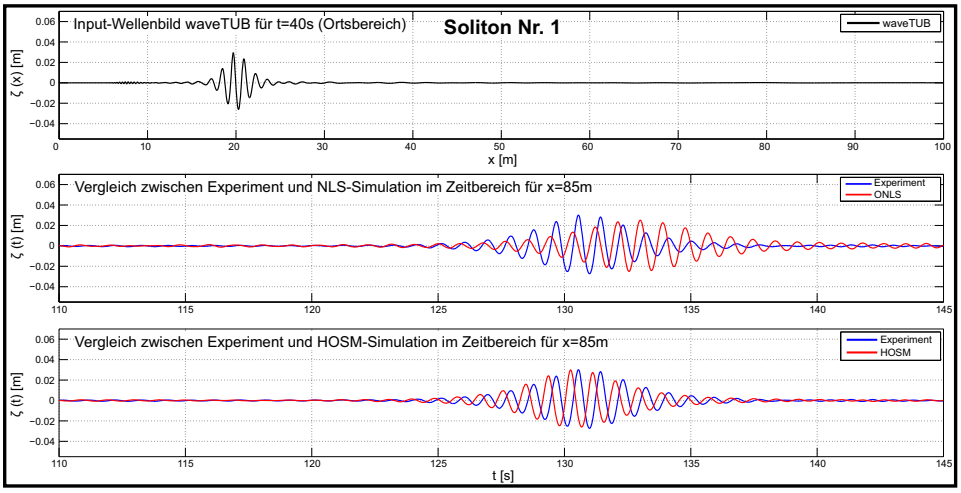

Abbildung 3.12: Wellenausbreitung des „Envelope Solitons“ mit moderater Steilheit ($k_0 A_0 = 0,15$). Das obere Diagramm zeigt das numerische Input-Wellenbild (waveTUB, Ortsbereich), die folgenden Diagramme vergleichen die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen – weit entfernt vom Wellenblatt ($x = 85\,m$, transformiert in den Zeitbereich) – mit denen der ONLS-Simulation (mittig) und der HOSM-Simulation (unten).

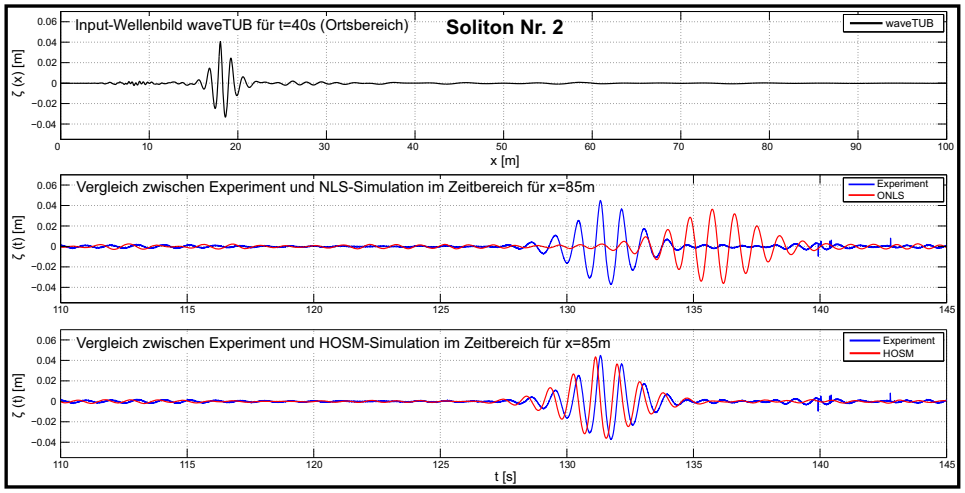

Abbildung 3.13: Wellenausbreitung des „Envelope Solitons“ mittlerer Steilheit ($k_0 A_0 = 0,23$). Das obere Diagramm zeigt das numerische Input-Wellenbild (waveTUB, Ortsbereich), die folgenden Diagramme vergleichen die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen – weit entfernt vom Wellenblatt ($x = 85\,m$, transformiert in den Zeitbereich) – mit denen der ONLS-Simulation (mittig) und der HOSM-Simulation (unten).

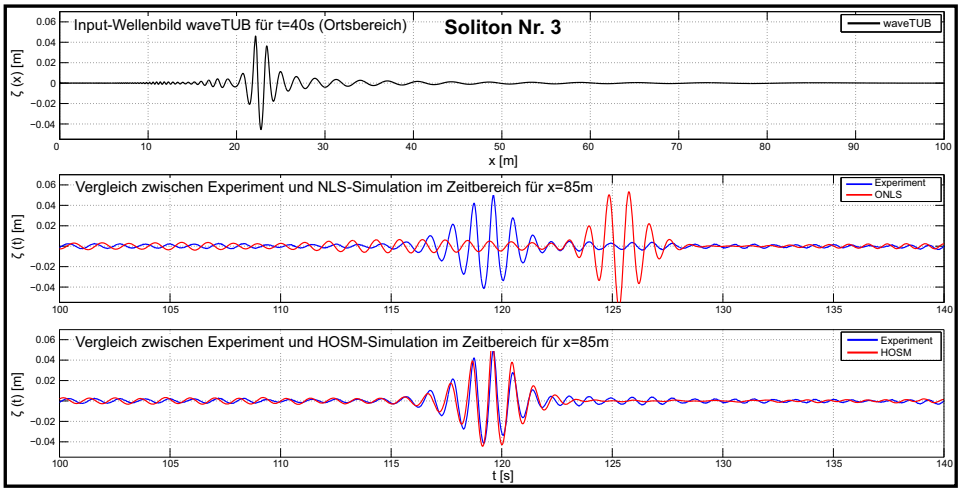

Abbildung 3.14: Wellenausbreitung der drei „Envelope Solitone“ mit hoher Steilheit ($k_0 A_0 = 0,30$). Das obere Diagramm zeigt das numerische Input-Wellenbild (waveTUB, Ortsbereich), die folgenden Diagramme vergleichen die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen – weit entfernt vom Wellenblatt ($x = 85\,m$, transformiert in den Zeitbereich) – mit denen der ONLS-Simulation (mittig) und der HOSM-Simulation (unten).

Die Grafiken machen deutlich, dass die nichtlineare Wellenausbreitung mit der NLS-Simulation hinreichend genau beschrieben werden kann, wenn auch – wie bereits bei der Untersuchung im Zeitbereich festgestellt – der zeitliche Versatz zwischen Experiment und NLS-Simulation mit zunehmender Wellensteilheit aufgrund der zugrundeliegenden linearen Dispersionsgleichung zunimmt. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die Einsatzgrenze für die NLS-Simulation bei moderaten Wellenhöhen liegt – sowohl hinsichtlich der Phasenlage als auch der Übereinstimmung individueller Wellen. Die Ergebnisse für die HOSM hingegen zeigen, dass mit dieser Methode die nichtlineare Wellenausbreitung sehr genau beschrieben werden kann – der zeitliche Versatz zwischen Messung und Simulation und die Übereinstimmung individueller Wellen sind signifikant besser (insbesondere für die steileren Wellengruppen, siehe Abb. 3.14 unten).

3.4.2.2 Peregrine Breather

Analog zu den Analysen im Zeitbereich (TNLS) werden die Breather Lösungen wieder verwendet, um die implementierten Methoden (ONLS & HOSM) hinsichtlich ihrer Wiedergabe des Wassertiefeneinflusses zu bewerten. Da sowohl die variablen Wassertiefen als auch die notwendigen Wellenkanallängen in der Versuchseinrichtung nicht realisierbar sind, werden die nachfolgenden Untersuchungen – analog zu den Analysen im Zeitbereich – ausschließlich numerisch mit dem nichtlinearen Referenzverfahren waveTUB durchgeführt. Die waveTUB-Simulationen werden dabei sowohl für die Erzeugung des Eingangs-Schnappschusses zum Zeitpunkt $t = 105\,s$ (Wellengruppe voll entwickelt, nah am Wellenblatt), als auch für deren Validierung zum Zeitpunkt der maximalen Wellenerhebung verwendet (Referenz für Validierung; $t = 197\,s$ für $d = 4\,m$, $t = 235\,s$ für $d = 2\,m$ und $t = 388\,s$ für $d = 1\,m$ – vgl. Abb. 3.8). Es wird die gleiche Wasserpiegelauslenkung am Wellenblatt bei den drei verschiedenen Wassertiefen simuliert.

Abbildung 3.15 präsentiert die Ergebnisse dieser Untersuchung für die drei unterschiedlichen Wassertiefen im Ortsbereich. Jede der drei Teilabbildungen ist dabei wie folgt aufgebaut: Das obere Diagramm zeigt das numerische waveTUB-Input-Wellenbild, das mittlere und untere Diagramm vergleichen die waveTUB-Simulation zum Zeitpunkt der maximalen Wellenerhebung mit der ONLS- bzw. der HOSM-Simulation.

Die Abbildung verdeutlicht, dass die nichtlineare Wellenausbreitung auch mit der NLS-Simulation im Ortsbereich hinreichend genau beschrieben werden kann. Wie schon im Zeitbereich dargestellt zeigt sich auch hier, dass die NLS-Gleichung aufgrund der zugrunde liegenden, linearen Dispersionsgleichung einen zeitlichen Versatz zu der voll nichtlinearen Simulation (waveTUB) aufweist. Insgesamt lässt sich aber zusammenfassen, dass die nichtlinearen Effekte und der Wassertiefeneinfluss ausreichend genau wiedergegeben werden können.

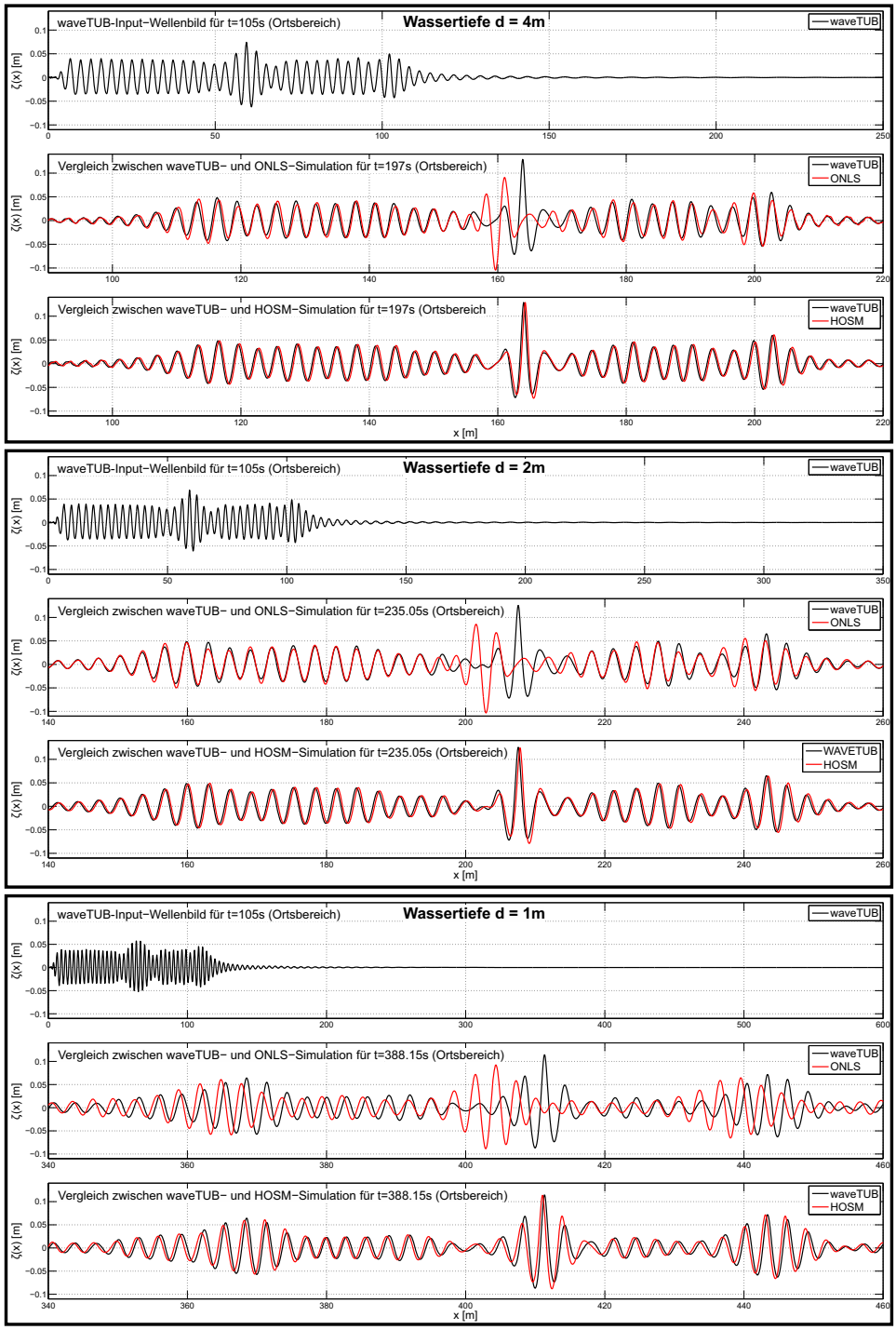

Abbildung 3.15: Wellenausbreitung der drei „Peregrine-Breather“ bei $d = 4\,m$ (oberer Kasten), $d = 2\,m$ (mittlerer Kasten) und $d = 1\,m$ (unterer Kasten). Die Teilabbildungen gliedern sich dabei wie folgt: Vergleich waveTUB-, ONLS- und HOSM-Simulation. Das obere Diagramm zeigt das numerische Input-Wellenbild (Ortsbereich), das mittlere vergleicht die waveTUB-Simulation mit der ONLS-Simulation (Ortsbereich) und das untere mit der HOSM-Simulation (jeweils zum Zeitpunkt der maximalen Wellenerhebung im Ortsbereich).

Des Weiteren belegt Abbildung 3.15, dass die nichtlineare Wellenausbreitung mit der HOS Methode deutlich genauer beschrieben werden kann. Wie schon in Abbildungen 3.12 - 3.14 für die analysierten Solitone zeigt sich auch hier bei den Breather Lösungen, dass die HOSM Simulationen nur einen vernachlässigbar kleinen zeitlichen Versatz zu den voll nichtlinearen Simulationen (waveTUB) aufweisen. Insgesamt ergibt sich, dass die Übereinstimmung zwischen den waveTUB-Simulationen und den HOSM-Simulationen sehr genau ist (insbesondere hinsichtlich der großen Propagationsweite der simulierten Wellengruppen) und dass der Wassertiefeneinfluss korrekt wiedergegeben wird.

Räumliche Limitierung

Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der ONLS und HOSM konnte bestätigt werden. Darüber hinaus wurden die nichtlinearen Welle-Welle-Interaktionen – in Bezug auf die Wellensteilheit ϵ und die relative Wassertiefe kd – anhand kritischer Normwellengruppen korrekt wiedergegeben.

Im Anschluss werden die bereits im Zeitbereich untersuchten irregulären Seegänge (siehe Tab. 3.5) mittels ONLS und HOSM im Ortsbereich analysiert. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei wieder auf der Variation der Wellensteilheit ϵ, der relativen Wassertiefe kd und spektralen Bandbreite γ (vgl. Kap. 3.3.2 und 3.4.1).

Dabei gilt es jedoch die räumliche Limitierung für die Vorhersage im Ortsbereich zu berücksichtigen. Diese wird durch die maximale räumlich erfassbare Wellensequenz im Ortsbereich definiert. In der Realität wird diese durch die maximale Reichweite der Radarmessung vorgegeben ($\leq 3\,sm$, vgl. Kap. 1.3.1), bei den Modellversuchen wird sie durch die endliche Länge des Seegangsbeckens bestimmt. Für längere Seegänge, wie die zu untersuchenden irregulären Seegänge, bedeutet dies, dass lediglich ein Teilausschnitt als Eingangs-Schnappschuss für die numerische Vorhersage verwendet werden kann. Da aber der einlaufende Seegang, sowohl in der Realität, als auch bei den Modellversuchen, kontinuierlich weiter läuft, kommen neue, vorher nicht registrierte Wellenkomponenten in den Vorhersagebereich. Abhängig von der jeweiligen Ausbreitungsgeschwindigkeit überlagern sich Einzelwellen dieses neuen Seegangs mit den langsameren Wellen des ursprünglich detektierten Systems. Als Folge kommt es zu abweichenden Prognosen mit zunehmender Vorhersagedauer.

Abbildung 3.16 verdeutlicht dieses Problem anschaulich am exemplarisch gewählten irregulären Seegang Nr.13 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 8,5\,m$, $\gamma = 3$, vgl. Tab. 3.5). Die linke Abbildung zeigt die Eingangs-Wasserspiegelauslenkung im Ortsbereich für die numerische Vorhersage bei $t \approx 433\,s$. Die rechte Abbildung vergleicht die darauf basierende Vorhersage im Zeitbereich mit dem experimentell gemessenen irregulären Seegang an der Ziellokation ($x = 4125\,m$). Die Prognose zeigt eine anfänglich gute Übereinstimmung

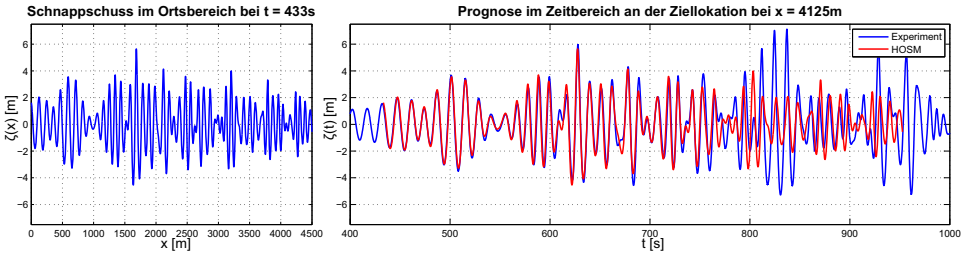

Abbildung 3.16: Veranschaulichung der abnehmenden Vorhersagegenauigkeit mit zunehmender Simulationsdauer am Beispiel des exemplarisch gewählten irregulären Seegangs Nr.13 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 8,5\,m$, $\gamma = 3$).

mit der experimentell gemessenen Wasserspiegelauslenkung. Mit zunehmender Vorhersagedauer ($\geq$ 360 s) kommt es zu immer stärkeren Abweichungen der Vorhersage.

Abbildung 3.17 vergleicht eine Teilprognosen der irregulären Seegänge Nr.2 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 1,83\,m$, $\gamma = 3$) und Nr.10 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 4,25\,m$, $\gamma = 3$) über 520 Sekunden. Aus dem direkten Vergleich wird ersichtlich, dass die Zeitspanne des korrekt prognostizierten Seegangs maßgeblich von der dominierenden Wellenlänge und der damit verbundenen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit abhängig ist. Die Prognosegüte von Seegang Nr.2 ist über die komplette Prognosedauer ausreichend gut, für Seegang Nr.10 nimmt sie hingegen bereits nach der Hälfte der Vorhersage deutlich ab.

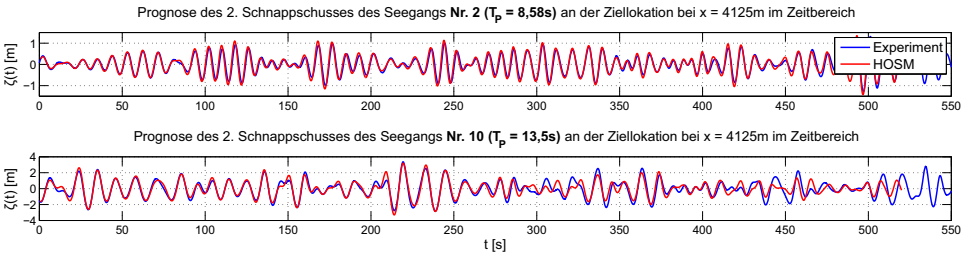

Abbildung 3.17: Vergleich der abnehmenden Vorhersagegenauigkeit mit zunehmender Simulationsdauer am Beispiel exemplarisch gewählter irregulärer Seegange unterschiedlicher Peak-Periode – oben: Nr.2 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 1,83\,m$, $\gamma = 3$), unten: Nr.10 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 4,25\,m$, $\gamma = 3$).

Um eine ausreichende Vorhersagegenauigkeit zu gewährleisten wird nachfolgend eine Erweiterung der semi-experimentellen Prozedur erläutert und bewertet.

3.4.2.3 Irreguläre Seegänge

Im Folgenden werden die bereits im Zeitbereich untersuchten irregulären Seegänge (siehe Tab. 3.5) mittels ONLS und HOSM im Ortsbereich analysiert und für exemplarisch gewählte Seegänge grafisch ausgewertet. Der

Fokus der Untersuchung liegt dabei auf der Peak-Periode T_P sowie der Wellensteilheit ϵ. Hierbei stellen die Seegänge mit moderater Peak-Periode ($T_P = 8,58\,s$) realistische Einsatzbedingungen, die Seegänge mit hohen Peak-Perioden $T_P = 13,5\,s$ extreme Einsatzbedingungen dar.

Um das Problem der Vorhersageungenauigkeit bei zunehmender Simulationszeit von kontinuierlich einlaufendem Seegang zu vermeiden, wird die semi-experimentelle Prozedur erweitert und – ähnlich der Radarerfassung in der Realität – kontinuierlich neue Schnappschüsse der Wasserspiegelauslenkung im Ortsbereich für aktualisierte Vorhersagen verwendet. Abbildung 3.18 verdeutlicht diese Prozedur anhand des irregulären Seegangs Nr.2 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 1,83\,m$, $\gamma = 3$, vgl. Tab. 3.5). Die oberste Teilabbildung zeigt die experimentell gemessene Wasserspiegelauslenkung an der Ziellokation ($x = 4125\,m$) im Zeitbereich, welche das Prognostitionsziel/Validierungsszenario darstellt. In den darunter folgenden vier Zeilen sind, analog zu Abbildung 3.16, links die Eingangs-Wasserspiegelauslenkungen im Ortsbereich und rechts die darauf basierenden numerischen Vorhersagen für die Ziellokation ($x = 4125\,m$) im Zeitbereich dargestellt. Die vier Eingangs-Schnappschüsse (bei $t_1 = 433\,s$, $t_2 = 649\,s$, $t_3 = 865\,s$ und $t_4 = 1021\,s$) erfassen den irregulären Seegang in vier Teilbereichen ($\Delta t = 216\,s$) vollständig. Die entsprechenden Teilprognosen (HOSM) zeigen für die komplette Prognosedauer eine gute Übereinstimmung mit den experimentell gemessenen Ergebnissen. Die übereinstimmende Prognosedauer ist, wie zuvor erwähnt, von der dominierenden Wellenlänge und der damit verbundenen Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängig, und führt in diesem Fall ($T_P = 8,58\,s$) durch die verhältnismäßig geringe Peak-Periode zu wesentlich länger realisierbaren Prognosezeiträumen ($520\,s$). Die untere Teilabbildung stellt die überlagerten vier Teilprognosen[8] dar und schließt die erweiterte, semi-experimentelle Prozedur ab, welche nachfolgend für die Analysen aller irregulären Seegänge verwendet wird.

Die einzelnen Teilprognosen zeigen eine durchweg gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Dies lässt im Rückschluss noch längere Prognosezeiträume bzw. größere Aktualisierungsintervalle für Seegänge mit kurzen dominierenden Wellenlängen zu. Innerhalb der großen Bereiche überlagerter Teilprognosen stellt sich die Stabilität des prognostizierten Seegangs in Form nahezu identischer Prognoseergebnisse dar.

Insgesamt soll die Analyse exemplarisch an vier irregulären Seegängen gezeigt werden – den Seegängen Nr.2, 5, 10 und 13 (siehe Tab. 3.5) – welche den Einfluss der Peak-Periode ($T_P = 8,58$ zu $T_P = 13,5$) und der jeweils verdoppelten Wellenhöhe ($H_S = 1,83\,m$ zu $H_S = 3,66\,m$ bzw. $H_S = 4,25\,m$ zu $H_S = 8,5\,m$) visualisieren. Die Simulationen werden hierbei ausschließlich mit der HOSM ermittelt, da diese im Rahmen der Voruntersuchungen an-

[8] reduziert auf $450\,s$ für eine eindeutige/verbesserte Visualisierung

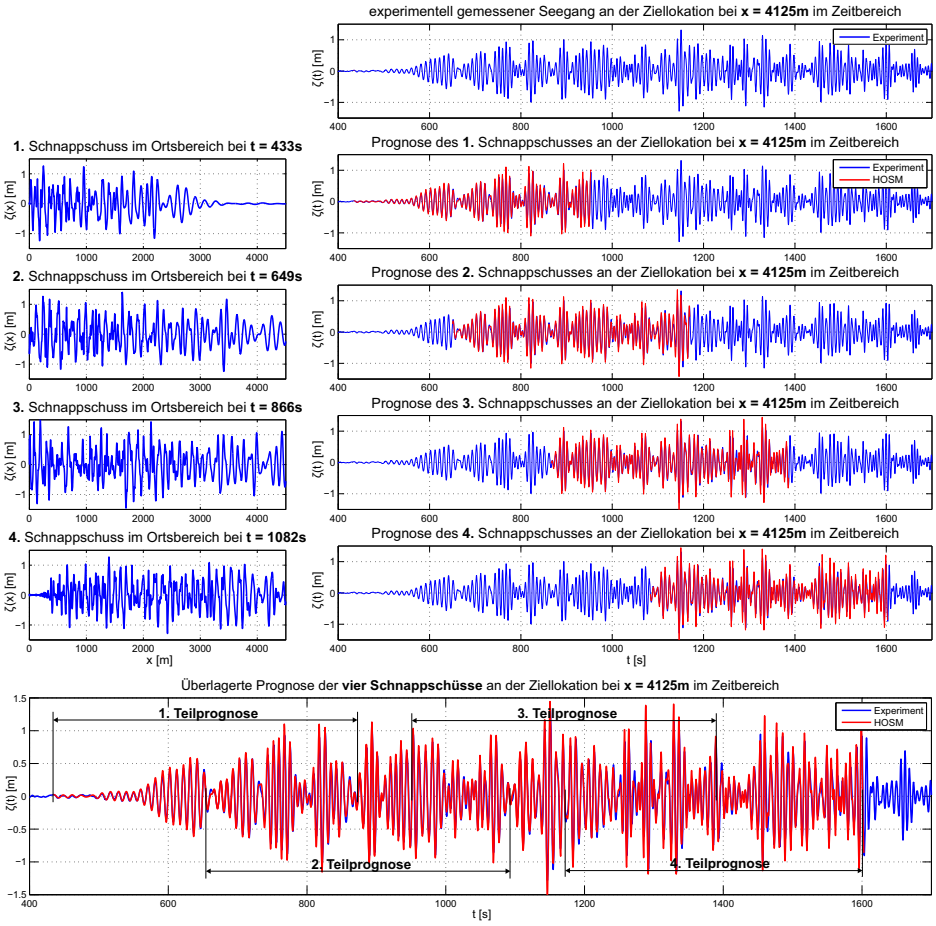

Abbildung 3.18: Prognose (HOSM) des irregulären Seegangs Nr.2 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 1,83\,m$, $\gamma = 3$) mittels semi-experimenteller Prozedur. Mit Hilfe jedes Schnappschusses im Ortsbereich (alle $216\,s$) werden im Anschluss $520\,s$ Seegang im Zeitbereich simuliert/prognostiziert, was eine kontinuierliche und aktuelle Prognose des zu erwartenden Seegangs ermöglicht.

hand der kritischen Normwellengruppen die besseren Simulationsergebnisse aufgewiesen hat.

Analog zu Abbildung 3.18 zeigt Abbildung 3.19 die Simulationsergebnisse für den irregulären Seegangs Nr.5 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 3,66\,m$, $\gamma = 3$). Die oberen vier Teilabbildungen präsentieren links die Eingangs-Wasserspiegelauslenkung im Ortsbereich und rechts die darauf basierenden numerischen Vorhersagen für die Ziellokation ($x = 4125\,m$) im Zeitbereich. Die vier Eingangs-Schnappschüsse (bei $t_1 = 433\,s$, $t_2 = 606\,s$, $t_3 = 779\,s$ und $t_4 = 952\,s$) erfassen den irregulären Seegang in vier Teilbereichen ($\Delta t = 173\,s$). Analog zu Abbildung 3.18 zeigen die entsprechenden Teilprognosen (HOSM) wieder für die komplette Prognosedauer eine gute Übereinstimmung mit

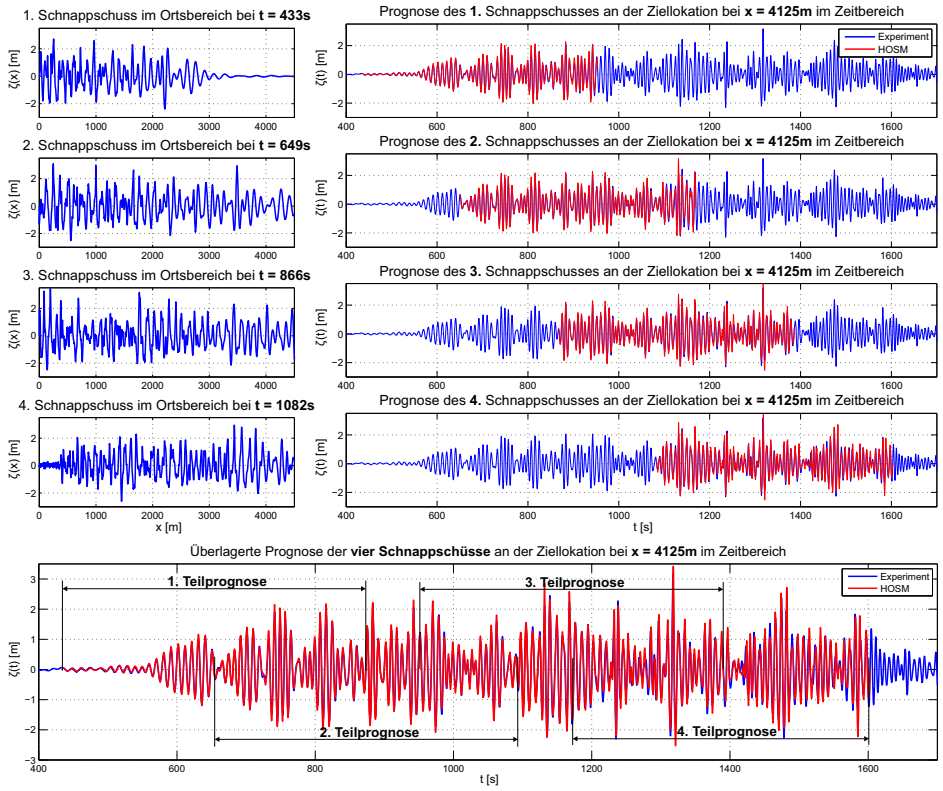

Abbildung 3.19: Prognose (HOSM) des irregulären Seegangs Nr.5 ($T_P = 8,58\,s$, $H_S = 3,66\,m$, $\gamma = 3$) mittels semi-experimenteller Prozedur. Mit Hilfe jedes Schnappschusses im Ortsbereich (alle $216\,s$) werden im Anschluss $520\,s$ Seegang im Zeitbereich simuliert/prognostiziert, was eine kontinuierliche und aktuelle Prognose des zu erwartenden Seegangs ermöglicht.

den experimentell gemessenen Ergebnissen. Die übereinstimmende Prognosedauer lässt – bei gleicher Peak-Periode und verdoppelter signifikanter Wellenhöhe – wiederum längere Prognosezeiträumen ($T_{Prog} = 520\,s$) zu. Die untere Teilabbildung stellt die überlagerten vier Teilprognosen und zeigt eine durchgehend gute Übereinstimmung.

Ähnlich Abbildung 3.19 zeigt Abbildung 3.20 die Simulationsergebnisse für den irregulären Seegangs Nr.10 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 4,25\,m$, $\gamma = 3$). Die oberen Teilabbildungen präsentieren die Eingangs-Wasserspiegelauslenkung im Ortsbereich (links) und die darauf basierenden numerischen Vorhersagen für die Ziellokation ($x = 4125\,m$) im Zeitbereich (rechts). Die vier Eingangs-Schnappschüsse (bei $t_1 = 433\,s$, $t_2 = 606\,s$, $t_3 = 779\,s$ und $t_4 = 952\,s$) erfassen den irregulären Seegang in vier Teilbereichen ($\Delta t = 173\,s$).

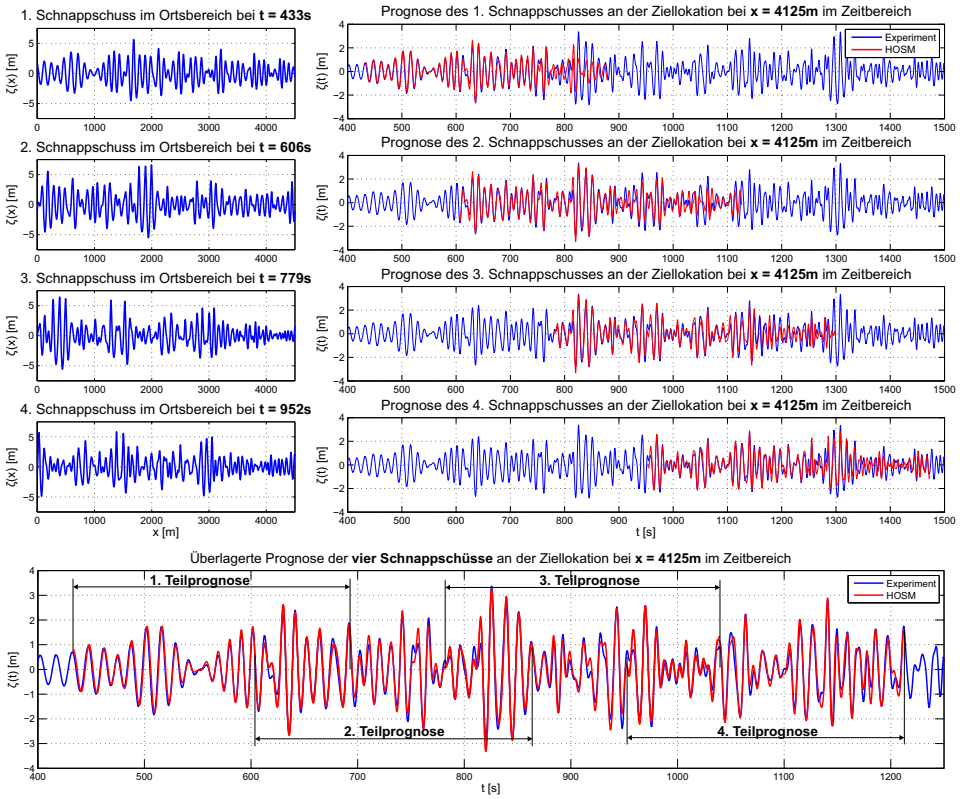

Abbildung 3.20: Prognose (HOSM) des irregulären Seegangs Nr.10 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 4,25\,m$, $\gamma = 3$) mittels semi-experimenteller Prozedur. Mit Hilfe jedes Schnappschusses im Ortsbereich (alle $173\,s$) werden im Anschluss $520\,s$ Seegang im Zeitbereich simuliert/prognostiziert (jedoch nur $260\,s$ für die Überlagerung verwendet), was eine kontinuierliche und aktuelle Prognose des zu erwartenden Seegangs ermöglicht.

Im Gegensatz zu den in Abbildungen 3.18 und 3.19 präsentierten, durchgehend guten Simulationsergebnissen (kurze Peak-Periode mit $T_P = 8,58\,s$, realisierbare Prognosezeiträume $T_{Prog} \geq 520\,s$) zeigen die Simulationen des Seegangs Nr.10 bereits nach circa $300\,s$ zunehmend Abweichungen der simulierten Seegänge. Dies beruht auf den bereits diskutierten, nachfolgenden Einzelwellen, welche auf Grund der erhöhten Peak-Periode eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit haben und somit die fortlaufende Simulation früher beeinflussen. Für die abschließende Überlagerung des Seegangs (unterste Teilabbildung) werden daher nur $260\,s$ der einzelnen Teilsimulationen verwendet. Insgesamt zeigt die überlagerte Prognose eine gute Übereinstimmung im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen.

Abbildung 3.21 zeigt, analog zu den vorherigen Abbildungen, die Simulation für den irregulären Seegang Nr.13 mit verdoppelter signifikanter Wellenhöhe bei gleichbleibender Peak-Periode ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 8,5\,m$,

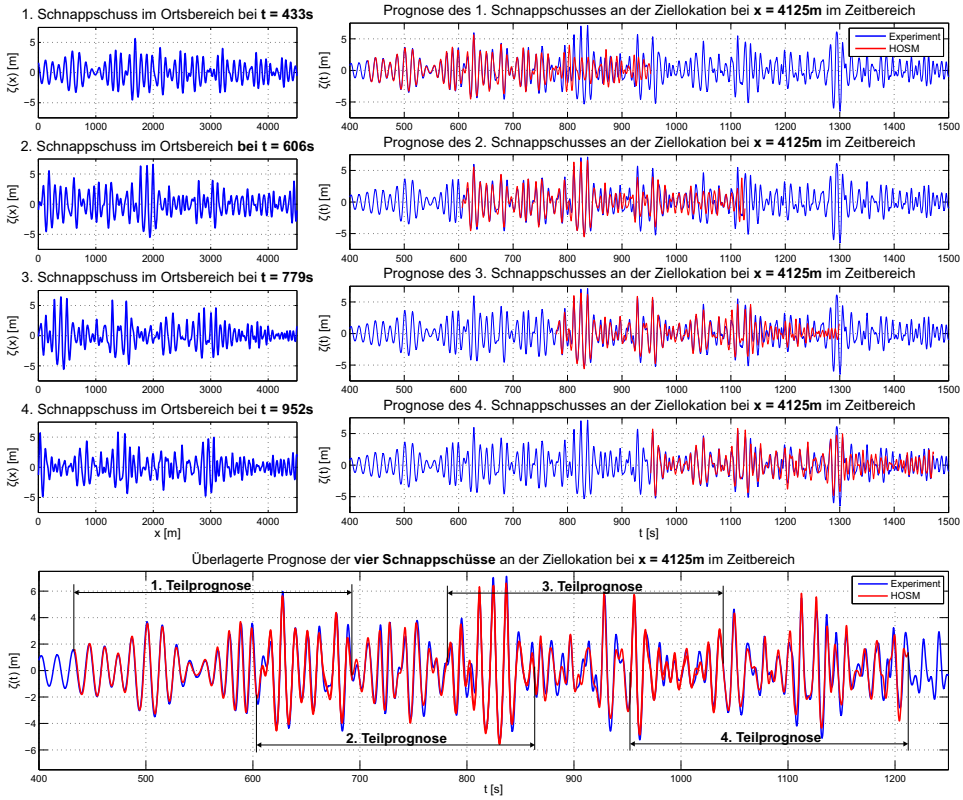

Abbildung 3.21: Prognose (HOSM) des irregulären Seegangs Nr.13 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 8,5\,m$, $\gamma = 3$) mittels semi-experimenteller Prozedur. Mit Hilfe jedes Schnappschusses im Ortsbereich (alle $173\,s$) werden im Anschluss $520\,s$ Seegang im Zeitbereich simuliert/prognostiziert (jedoch nur $260\,s$ für die Überlagerung verwendet), was eine kontinuierliche und aktuelle Prognose des zu erwartenden Seegangs ermöglicht.

$\gamma = 3$). Ähnlich der moderaten Seegänge Nr.2 und 5 zeigen die Teilsimulationen bei verdoppelter signifikanter Wellenhöhe vergleichbare Ergebnisse zum vorherigen Seegang. Mit zunehmender Simulationsdauer verschlechtert sich die Güte der Vorhersage, sodass auch hier für die abschließende Überlagerung des Seegangs (unterste Teilabbildung) nur $260\,s$ der einzelnen Teilsimulationen verwendet werden. Insgesamt zeigt die überlagerte Prognose eine gute Übereinstimmung im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen.

In Bezug auf die Einsatzbedingungen für das gewählte Szenario – Offshore Kranoperation – bietet die Vorhersage bei realisierbaren Einsatzbedingungen in Form moderater Peak-Perioden ausreichend große Prognosezeiträume $T_{Prog} \geq 520\,s$. Auch unter Extrembedingungen bieten die realisierbaren Prognosezeiträume ($T_{Prog} \leq 260\,s$) hinreichend viel Handlungsspielraum

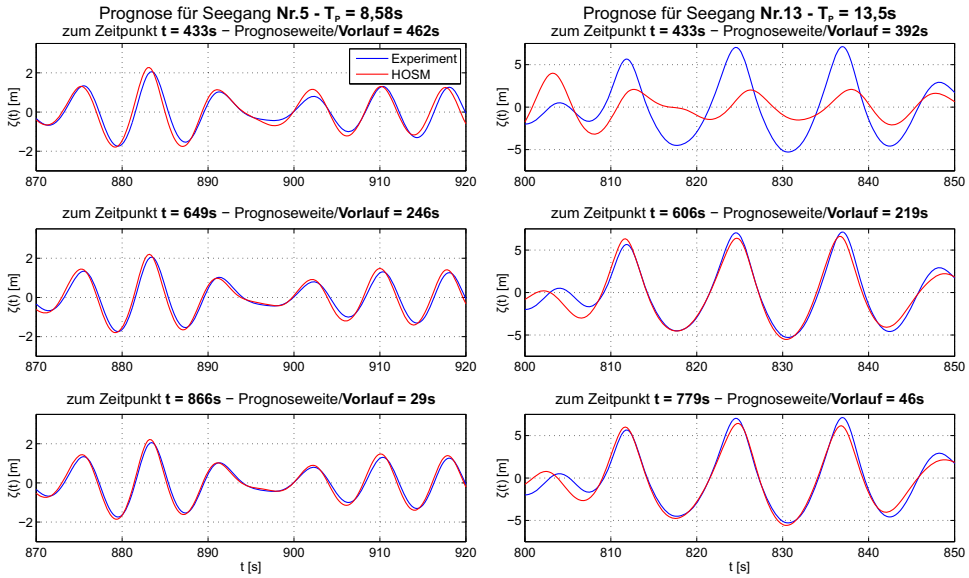

Abbildung 3.22: Vergleich der ersten drei Teilprognosen für Seegang Nr.5 (links, $T_P = 8,58\,s$, $H_S = 3,66\,m$, $\gamma = 3$) und Nr.13 (rechts, $T_P = 13,5\,s$, $H_S = 8,5\,m$, $\gamma = 3$) – Darstellung eines repräsentativen Prognosezeitfensters zu unterschiedlichen Prognosezeiten und resultierenden Prognoseweiten.

für seegangsbasierte Operationsentscheidungen. Abbildung 3.22 vergleicht exemplarisch die Prognosegüte der Seegänge Nr.5 und 13 in Abhängigkeit des jeweiligen Prognosevorlaufs zu drei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten – $t = 433\,s$, $649\,ms$ und $866\,s$ für Seegang Nr.5 bzw. $t = 433\,s$, $606\,ms$ und $779\,s$ für Seegang Nr.13. Deutlich zu erkennen ist die durchweg sehr gute Prognostizierbarkeit moderater Seegänge (links) für maximal realisierbare Prognosezeiträume ($T_{Prog} \geq 520\,s$). Die Prognosegüte ist bereits zum ersten Zeitpunkt ($t = 433\,s$) sehr gut und nimmt für die beiden folgenden Vorhersagen ($t = 606\,s$ und $866\,s$) nur geringfügig zu. Für extreme Seegänge dagegen reduziert sich die Prognoseweite – realisierbaren Prognosezeiträume ($T_{Prog} \leq 260\,s$) – auf Grund der erhöhten Ausbreitungsgeschwindigkeit nachlaufender Wellen deutlich. Die Prognosegüte ist beim ersten Zeitpunkt ($t = 433\,s$) mit einem Vorlauf von $392\,s$ noch vollkommen unzutreffend. Erst die Prognose zum zweiten Zeitpunkt ($t = 606\,s$) bietet mit einem Prognosevorlauf von $219\,s$ ($\leq 260\,s$) eine gute Prognosegüte, welche zum letzten Zeitpunkt ($t = 779\,s$) nur noch geringfügig verbessert werden kann.

Aufbauend auf Tabelle 3.5 (Überblick der analysierten, irregulären Seegänge) präsentiert Tabelle 3.6, neben den Parametern der analysierten Seegänge (H_S, T_P, γ, $\epsilon = \pi H/L$ und kd), deren Auswertung in Form der Prognosegüte aller Simulationsergebnisse (ONLS und HOSM). Dazu werden

Tabelle 3.6: Zusammenfassung der im Ortsbereich untersuchten irregulären Seegänge sowie der Simulationsgüte (Kreuzkorrelation (ρ) und Surface Similarity Parameter (SSP)) des jeweiligen Seegangs – beste Übereinstimmung bei $\rho = 1$ bzw. $SSP = 0$ (siehe Kapitel 2.3).

						Qualität Input	
Nr.	$T_P[s]$	kd	$H_S[m]$	ϵ	γ	ρ_W	SSP_W
1	**8,58**	**4,1**	**1,83**	**0,05**	1	0,95	0,15
2					**3**	**0,96**	**0,14**
3					6	0,97	0,13
4			**3,66**	**0,10**	1	0,94	0,17
5					**3**	**0,96**	**0,15**
6			5,48	0,15	1	0,88	0,25
7					3	0,9	0,23
8					6	0,95	0,16
9	**13,5**	**1,75**	**4,25**	**0,05**	1	0,98	0,10
10					**3**	**0,98**	**0,10**
11					6	0,98	0,10
12			**8,5**	**0,1**	10	0,97	0,13
13					**3**	**0,99**	**0,09**
14					6	0,98	0,09

	Qualität Vorhersage			
Nr.	ρ_{NLS}	SSP_{NLS}	ρ_{HOSM}	SSP_{HOSM}
1	0,83	0,3	0,98	0,12
2	**0,89**	**0,24**	**0,99**	**0,09**
3	0,91	0,21	0,98	0,10
4	0,85	0,28	0,99	0,10
5	0,85	0,27	0,99	0,09
6	0,82	0,30	0,92	0,18
7	0,82	0,30	0,92	0,18
8	0,82	0,30	0,94	0,16
9	0,69	0,39	0,96	0,15
10	**0,76**	**0,34**	**0,96**	**0,14**
11	0,86	0,26	0,95	0,17
12	0,75	0,35	0,95	0,16
13	**0,81**	**0,31**	**0,96**	**0,14**
14	0,84	0,28	0,96	0,14

die Zeitreihen mittels Kreuzkorrelation (ρ) und Surface Similarity Parameter (SSP) verglichen und bewertet (vgl. Kap. 2.3).

Zur Evaluierung der verwendeten Methoden werden Kreuzkorrelation und SSP sowohl für die Input-waveTUB-Simulation (ρ_W und SSP_W) als auch für die Seegangsvorhersage (ONLS (ρ_{NLS} und SSP_{NLS}) und HOSM (ρ_{HOSM} und SSP_{HOSM})) im Vergleich zur Messung an der jeweiligen Zielposition berechnet, um die Unterschiede beider Methoden quantitativ bewerten zu können. Für die überlappenden Registrierungen der Vorhersage wird für beide Koeffizienten der Mittelwert aus den vier Vorhersagen gebildet. Dabei werden die zu vergleichenden Signale mit variierendem zeitlichen Versatz untersucht, um sicherzustellen, dass ein konstanter Phasenversatz

nicht zu einem verfälschten Ergebnis führt.

Dies führt exemplarisch für den in Abbildung 3.21 zuletzt gezeigten irregulären Seegang Nr.13 ($T_P = 13,5\,s$, $H_S = 8,5\,m$, $\gamma = 3$) zu folgenden Güteparametern: die waveTUB-Simulation zeigt mit $\rho_W = 0,99$ und $SSP_W = 0,09$ eine exzellente Übereinstimmung und bestätigt die uneingeschränkte Anwendbarkeit und Genauigkeit der verwendeten nichtlinearen, numerischen Referenzmethode. Die Vorhersage mittels HOSM erzielt eine ebenso gute Überstimmung von $\rho_{HOSM} = 0,96$ und $SSP_{HOSM} = 0,14$, wohingegen die ONLS nur ausreichend genaue Ergebnisse liefert ($\rho_{NLS} = 0,81$ und $SSP_{NLS} = 0,31$).

3.4.3 Zusammenfassung

Insgesamt zeigt sich, dass die Vorhersagen mittels NLS-Simulation gute Ergebnisse erzielen und die HOS Methode gute bis sehr gute Ergebnisse liefert. Es bestätigt sich, dass die HOSM der NLS-Gleichung hinsichtlich der Simulationsgenauigkeit überlegen ist. Während die NLS-Simulationen für steilere Seegänge zunehmend ungenau werden, ergeben die HOSM-Simulationen auch für diese Seegänge gute Ergebnisse. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit **ausschließlich** die **HOSM für** die **Seegangsvorhersage** verwendet.

Nichts desto trotz bietet die NLS-Gleichung aufgrund ihrer signifikant kürzeren Berechnungsdauer[9] eine gute Simulationsbasis. Die zunehmende Ungenauigkeit der NLS-Simulationen bei steileren Wellengruppen basiert hauptsächlich auf der zugrunde liegenden linearen Dispersionsgleichung. Da die Wellengruppen grundsätzlich erfasst werden können und lediglich ein zeitlicher Versatz die Simulationen beeinträchtigt[10], könnten seegangsabhängige Korrekturparameter hierbei einen entscheidenden Rechenvorteil bei gleichbleibend geringen Simulationszeiten liefern.

3.4.4 Anwendung

Eine problemorientierte Anwendung wäre in der Kombination beider Methoden denkbar. Hierbei wird die schnelle und hinreichend genaue NLS-basierte Lösung für die „in situ“ Machbarkeitsentscheidung möglicher Operation vor Ort verwendet. Werden Wellengruppen detektiert, welche ein Operationskriterium überschreiten, so kann mit Hilfe der genaueren, etwas langsameren HOSM Berechnung wenig später die genaue Amplitude der Systemantwort sowie deren Eintreffen korrekt bestimmt und über den weiteren Operationsvorgang entschieden werden.

[9] $\leq 5\,s$ Rechenzeit der NLS-Gleichung gegenüber $20-30\,s$ der HOSM bei vergleichbaren Prognoseszenarien, $T_{Prog} = 240\,s$.

[10] Vergleiche Auswertung der kritischen Normwellengruppen im Zeit- und Ortsbereich.

Kapitel 4

Bewegungsvorhersage

Auf Basis des mittels HOSM prognostizierten Seegangs werden in diesem Kapitel die Strukturbewegungen prognostiziert. Dazu werden zunächst die numerisch ermittelten Bewegungsübertragungsfunktionen bestimmt, um viskose Dämpfungsbeiwerte erweitert und experimentell validiert. Auf Basis der validierten Übertragungsfunktionen können die Impulsantwortfunktionen gebildet werden, mit Hilfe derer die Strukturbewegung im Zeitbereich ermittelt werden können. Das Prognoseverfahren wird anhand bestehender Verfahren evaluiert und im Anschluss mit Hilfe von Modellversuchsreihen validiert und bewertet.

4.1 Strukturanalyseverfahren

Die Bewegungsvorhersage im Zeitbereich – auf Basis des zuvor vorhergesagten Seegangs – kann z.B. mittels spektraler Methode durchgeführt werden (vgl. Abb. 1.2). Dazu werden die ermittelten Seegangsdaten mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt, wo mit Hilfe der jeweiligen Übertragungsfunktion das Antwortspektrum gebildet werden kann. Dieses muss abschließend mit Hilfe inverser Fourier-Transformationen wieder in den Zeitbereich transformiert werden und ergibt so die Systemantwort der Struktur im Zeitbereich.

Alternativ, und vor allem viel direkter, lassen sich die Strukturbewegungen ausschließlich im Zeitbereich mit Hilfe von Faltungsintegralen bestimmen. Beide Methoden benötigen zuvor jedoch das individuelle Bewegungsverhalten der zu analysierenden Struktur im Frequenzbereich (vgl. Kap. 1.2.2). Die Bestimmung dieser Bewegungsübertragungsfunktionen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mit dem Potentialcode WAMIT, dessen Methodik im Folgenden zusammengefasst ist.

4.1.1 Potentialtheoretische Analyse – WAMIT

Unter der Voraussetzung eines inkompressiblen, reibungs- und rotationsfreien Fluides (siehe Gl. 2.5 - 2.8) sowie der Annahme eines linearen Systems, kann das Gesamtpotential Φ als Superposition der verschiedenen Einzelwellensysteme angenommen werden (Newman (1977)):

$$\Phi = \Phi_0 + \sum_{l=1}^{6} \Phi_l + \Phi_7 \tag{4.1}$$

Hierbei beschreibt Φ_0 das ungestörte, einlaufende Initialwellenfeld, welches mit Hilfe der linearen Wellentheorie (u.a. nach Clauss et al. (1992)) z.B. durch

$$\Phi_0 = -\frac{\zeta_a \omega}{k} \frac{coshk(z+d)}{sinhkd} cos(kx - \omega t) \tag{4.2}$$

beschrieben werden kann. Die Wellenzahl k kann über die Dispersionsgleichung ermittelt werden, t gibt den entsprechenden Zeitparameter wieder.

Das Potential Φ_7 beschreibt das Diffraktionswellenfeld, welches sich aus Beugung und Reflexion des Initialwellenfeldes – aufgrund der hydrodynamisch kompakten Struktur – ergibt.

Das Radiationswellenfeld, verursacht durch die angeregten Starrkörperbewegungen der zu untersuchenden Struktur, kann mit Hilfe der sechs Radiationspotentiale Φ_l $(l = 1, 2, ..., 6)$ als Antwort auf die Strukturbewegung in l-Richtung bzgl. des Strukturgewichtsschwerpunktes (x_{cg}, y_{cg}, z_{cg}) beschrieben werden. Diese Radiationspotentiale lassen sich in die Strukturgeschwindigkeiten $\underline{\dot{s}}_l$ und die dazugehörigen Geschwindigkeitspotentiale φ_l

$$\Phi_l = \dot{s}_l \varphi_l = -i\omega s_l \varphi_l \tag{4.3}$$

für die einzelnen Bewegungsfreiheitsgrade[1] l aufteilen.

Alle Potentiale des dargestellten hydrodynamischen Problems müssen die Laplace-Gleichung (2.5) sowie die Randbedingungen am Boden, der freien Flüssigkeitsoberfläche sowie der Strukturoberfläche erfüllen. Um das Problem eindeutig lösen zu können, müssen die Radiationspotentiale Φ_l und das Diffraktionspotential Φ_7 zusätzlich der Sommerfeld'schen[2] Ausstrahlungsbedingung genügen.

Um das zusammengesetzte Randwertproblem geeignet lösen zu können, wird es zur Vereinfachung in Integralgleichungen überführt. Die Volumenintegrale werden mit Hilfe der *Green'schen* Funktion in Oberflächenintegrale vereinfacht. Die genaue Herleitung der einzelnen Integrale wird von Newman (1977) eingehend beschrieben.

[1] 1 – schnellen/surge , 2 – driften/sway, 3 – tauchen/heave, 4 – rollen/roll, 5 – stampfen/pitch und 6 – gieren/yaw

[2] Die Sommerfeld'sche Ausstrahlungsbedingung, benannt nach Arnold Sommerfeld, wurde entwickelt um das Ausstrahlungkriterium für Skalarfelder inhomogener Gleichungen zu definieren – "the sources must be sources, not sinks of energy". (Sommerfeld (1949))

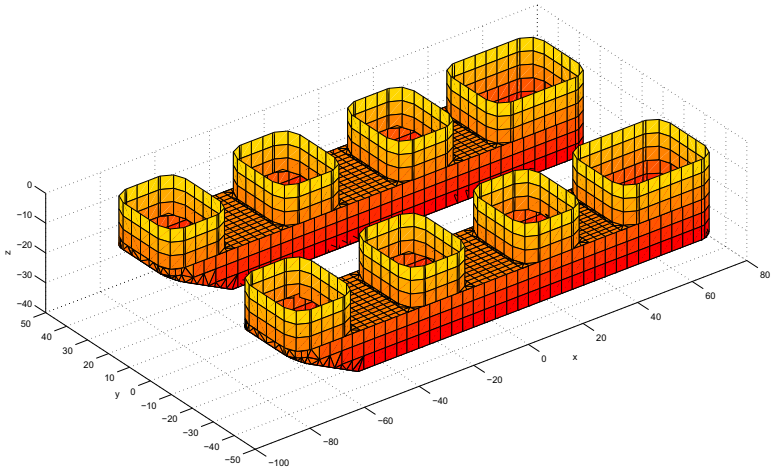

Abbildung 4.1: *Diskretisierung des Kranhalbtauchers Thialf (1876 Panels)*

Für beliebige Geometrien müssen die Oberflächenintegrale der Körperradiationspotentiale ϕ_l und der Gesamtdiffraktionspotentiale Φ_D[3] numerisch gelöst werden. Dazu muss die zu analysierende Struktur in N Flächen (Panele) aufgeteilt (diskretisiert) werden, für welche die Integrale letztlich gelöst und die Potentiale bestimmt werden können. Abbildung 4.1 stellt exemplarisch die diskretisierte Struktur des Kranhalbtauchers Thialf dar.

Mit den numerisch ermittelten Potentialen kann der dynamische Druck aus der linearisierten Bernoulli-Gleichung

$$p_{dyn} = -\rho \left(\frac{\partial \Phi_0}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_7}{\partial t} + \sum_{l=1}^{6} \ddot{s}_l \varphi_l \right) \tag{4.4}$$

bestimmt werden und somit die hydrodynamische Kraft durch Integration über die benetzte Körperoberfläche

$$\underline{F}_{dyn} = \iint_{S_b} p_{dyn} \underline{n} dS_b \tag{4.5}$$

berechnet werden. Dies geschieht für die in n Panele/Flächen disketisierte Struktur. Unter Berücksichtigung der hydrodynamischen wie auch der resultierend veränderten hydrostatischen Kräfte ergibt sich nach dem 2. Newton'schen Gesetz das Kräftegleichgewicht zu

$$\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\ddot{s}} = \underline{F}_{dyn} - \underline{\underline{C}} \cdot \underline{s} \tag{4.6}$$

[3] $\Phi_D = \Phi_0 + \Phi_7$

welches nach Trennung in Struktur- (links) und Erregerkräfte (rechts) die Bewegungsdifferentialgleichung für ein eingeschwungenes System ergibt:

$$(\underline{\underline{M}} + \underline{\underline{A}}) \cdot \ddot{\underline{s}} + \underline{\underline{B}} \cdot \dot{\underline{s}} + \underline{\underline{C}} \cdot \underline{s} = \underline{F}_{ex}. \tag{4.7}$$

Unter der Annahme harmonischer Strukturantworten $\underline{s}(t) = \underline{s}_a \cdot e^{-i\omega t + i\epsilon}$ aufgrund harmonischer Anregung $\zeta(t) = \zeta_a \cdot e^{-i\omega t}$ wird die Bewegungsgleichung durch das Kürzen des Terms $e^{-i\omega t}$ zeitunabhängig. Mit Bezug auf die Wellenamplitude ζ_a ergibt sich die Übertragungsfunktion $H(\omega) = \frac{\underline{s}_a}{\zeta_a} \cdot e^{i\epsilon}$ aus

$$\left[-\omega^2(\underline{\underline{M}} + \underline{\underline{A}}) - i\omega\underline{\underline{B}} + \underline{\underline{C}}\right] \frac{\underline{s}_a}{\zeta_a} e^{i\epsilon} = \frac{\underline{F}_{ex}}{\zeta_a} e^{i\gamma}. \tag{4.8}$$

Die zur Lösung notwendigen Koeffizienten für die hydrodynamische Masse und der Potentialdämpfung können aus den Radiationspotentialen über die Gleichung

$$a_{kl} + \frac{i}{\omega} b_{kl} = \rho \iint_{S_b} \phi_l n_k dS \tag{4.9}$$

bestimmt werden (Newman (1977)). Die frequenzabhängigen Koeffizienten folgen aus dem Real- bzw. dem Imaginärteil der rechten Seite der Gleichung 4.9 – hierbei indiziert k die Kraftwirkungsrichtung, l die Strukturbewegungsrichtung und n ist der erweiterte Normalenvektor.

Mit Hilfe der numerisch bestimmten Übertragungsfunktionen $H(\omega) = \frac{\underline{s}_a}{\zeta_a} \cdot e^{i\epsilon}$ (nach Betrag und Phase) werden im Anschluss die Methoden zur Ermittlung der Strukturbewegung im Zeitbereich erläutert.

4.1.2 Potentialtheoretische Erweiterung – Viskose Dämpfung

Ein schwimmender, bewegter Körper strahlt Wellen ab – dies wird als Radiation bezeichnet und resultiert in der stetigen Abnahme der körpereigenen kinematischen Energie, welches wiederum gedämpfte Strukturbewegungen zur Folge hat. Dieser Effekt wird als Potentialdämpfung bezeichnet und wird von Potentiallösern mit berücksichtigt. Im Gegensatz dazu können viskose Effekte nicht berücksichtigt werden, haben allerdings einen signifikanten Einfluss auf das Resonanzverhalten solcher Strukturen.

In der allgemeinen Bewegungsgleichung

$$(\underline{\underline{M}} + \underline{\underline{A}}) \cdot \ddot{\underline{s}} + \underline{\underline{B}} \cdot \dot{\underline{s}} + \underline{\underline{C}} \cdot \underline{s} = \underline{F}_{ex} \tag{4.10}$$

wird die Potentialdämpfung mit Hilfe der Matrix $\underline{\underline{B}}$ erfasst. Diese lässt sich unter Verwendung des harmonischen Ansatzes $\underline{s} = \underline{s}_a e^{-i\omega t + i\theta}$ zu

$$\sum_{l=1}^{6} \left[-\omega^2(m_{kl} + a_{kl}) + i\omega b_{kl} + c_{kl}\right] s_l = f_{ex,l} \tag{4.11}$$

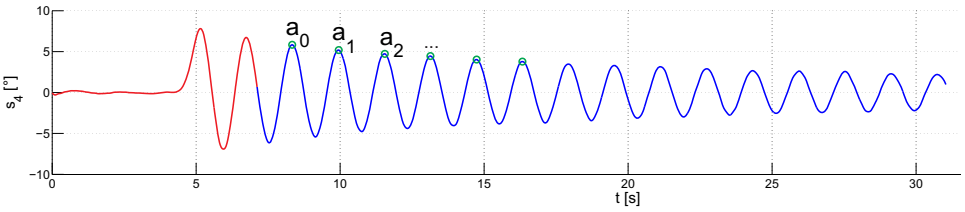

Abbildung 4.2: *Beispiel eines Roll-Ausschwingversuches – Initialauslenkung sowie Folgeschwingung (rot) werden nicht berücksichtigt. Die folgenden Extrema (grün, a_i) können für die Analyse verwendet werden.*

umformen, wobei k die Kraftangriffs- und l die Kraftwirkungsrichtung bestimmt.

Um die nichtlinearen, viskosen Effekte für die potentialtheoretischen Analysen dieser Arbeit mit zu berücksichtigen – nichtlineare Abhängigkeit von der Amplitude der Strukturantwort – werden die viskosen Anteile mit dem folgenden experimentellen Ansatz linearisiert erfasst.

Dazu werden Modellversuche (Ausschwingversuche) für die von viskosen Effekten stark beeinflussten Freiheitsgrade, wie die roll- oder pitch-Bewegung, im Seegangsbecken durchgeführt. Ein exemplarischer Beispielversuch ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Struktur wird in ruhendem Wasser initial ausgelenkt und frei gelassen – abgesehen von der Initialauslenkung wird im Anschluss das Ausschwingverhalten des Körpers ungestört gemessen und analysiert.

Mit Hilfe der gemessenen Amplituden a_i (Minima oder Maxima) kann das logarithmische Dekrement

$$\Lambda = \frac{1}{n} ln \left(\frac{a_0}{a_n} \right) \tag{4.12}$$

bestimmt werden, mit Hilfe dessen sich der Dämpfungsgrad

$$\delta = \frac{\Lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \Lambda^2}} \tag{4.13}$$

ermitteln lässt. Dieser repräsentiert dabei das Verhältnis zwischen Gesamtdämpfung (gemessen) und kritischer Dämpfung $b_{c,kl}$, welche durch

$$b_{c,kl} = 2(m_{kl} + a_{kl})\omega_{r,kl} \tag{4.14}$$

definiert wird und über δ mit der Gesamtdämpfung

$$b_{t,kl} = \delta b_{c,kl}, \tag{4.15}$$

verknüpft ist (mit m_{kl} als Strukturmasse und a_{kl} als hydrodynamische Masse im Resonanzfall ($\omega_{r,kl}$)).

Da die gemessene, totale Dämpfung $b_{t,kl}$ beide Teileffekte beinhaltet, kann mit Hilfe der potentialtheoretisch ermittelten Potentialdämpfung b_{kl} der Anteil der viskosen Dämpfung $b_{v,kl}$ über

$$b_{v,kl} = b_{t,kl} - b_{kl} \tag{4.16}$$

bestimmt werden.

Diese viskosen Dämpfungsbeiwerte können somit unter Verwendung zusätzlicher, externer Dämpfungsmatrizen $\underline{\underline{B}}_{ext}$ in der Bewegungsgleichung (vgl. Gl. 4.7) mit berücksichtigt werden.

Wichtig: Da die Modellversuche ausschließlich unter Froud'scher Ähnlichkeit durchgeführt werden – Inertial- und Massenkräfte dominieren – können viskose Effekte nicht maßstabsgerecht abgebildet werden. Als Folge wird die Gesamtdämpfung des Systems im Vergleich zur Großausführung überschätzt.

4.2 Bewegungprognoseverfahren

Jede Offshore-Struktur stellt ein individuelles, hydrodynamisches Transfersystem dar, welches durch die Anregung mittels natürlichen Seegangs die entsprechenden Strukturantworten hervorruft (vgl. Abb. 1.2). Die Übertragungsfunktion $H(\omega_n) = \frac{s(\omega_n)}{\zeta(\omega_n)}$ beschreibt das Verhältnis dieser Strukturantworten in Abhängigkeit des einfallenden Seegangs (vgl. Kap. 1.2.2).

Die Bestimmung des Strukturverhaltens im Zeitbereich kann mittels spektraler Methode oder mit Hilfe von Faltungsintegralen durchgeführt werden. Beide Verfahren stützen sich auf die jeweiligen Übertragungsfunktionen und werden im Folgenden näher beschrieben.

4.2.1 Spektrale Methode

Bei der Spektralen Methode muss der im Zeitbereich vorhergesagte Seegang $\zeta(t)$ zunächst mittels Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt werden. Hier, im Frequenzbereich, wird dann das somit erzeugte Seegangsspektrum $S_\zeta(\omega)$ mit dem Betrag der quadrierten Bewegungsübertragungsfunktion $|H_i(\omega)|^2$ multipliziert $(\cdot)$, um das entsprechende Antwortspektrum

$$S_{s_i}(\omega) = S_\zeta(\omega) \cdot |H_i(\omega)|^2 \tag{4.17}$$

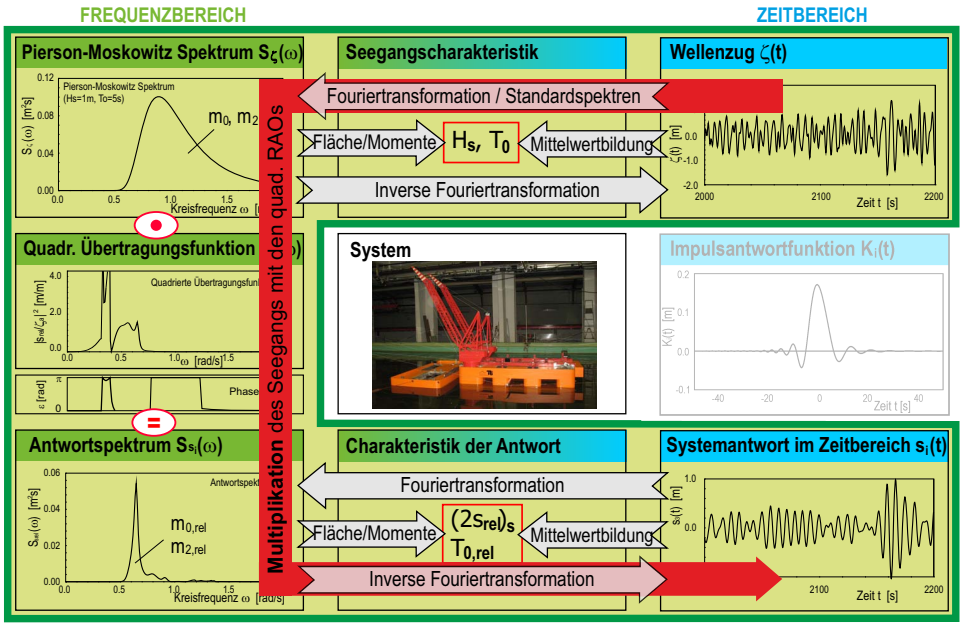

Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der spektralen Methode für hydrodynamische Analysen im Frequenz- und Zeitbereich (*Wellenzug* $\xrightarrow{FFT}$ *Seegangsspektrum* • RAO^2 = *Antwortspektrum* $\xrightarrow{IFFT}$ *Systemantwort*).

zu erhalten. Für die Systemantwort $s_i(t)$ im Zeitbereich muss dieses dann mittels Inverser Fast Fourier Transformation (IFFT) – unter Berücksichtigung (oder Einbeziehung) der Phase – wieder in den Zeitbereich rücktransformiert werden. Das Verfahren ist in Abbildung 4.3 (grün unterlegt) schematisch dargestellt. Die grundlegenden Transformationen und Zusammenhänge sind in Kapitel 1.2.2 zusammengefasst.

Das spektrale Verfahren bietet eine bewährte Methode für die Ermittlung von Strukturantworten im Zeitbereich. Auf Grund der erforderlichen Hin- und Rücktransformationen zwischen Zeit- und Frequenzbereich wird jedoch eine direktere Methode für die Bewegungsvorhersage in das zu entwickelnde System implementiert, sodass die spektrale Methode im Rahmen dieser Arbeit nur zur Validierung verwendet wird.

4.2.2 F2T+ -Verfahren

Um die Bewegungsvorhersage ausschließlich im Zeitbereich durchzuführen, werden aus den im Vorfeld ermittelten Bewegungsübertragungsfunktionen $H_i(\omega)$ die Impulsantwortfunktionen (IAF)

$$K_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_i(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \tag{4.18}$$

gebildet. Die im Frequenzbereich definierten Übertragungsfunktionen $H_i(\omega)$ sind dabei mit den im Zeitbereich definierten Impulsantwortfunktionen $K_i(t)$ über das Fouriertransformationspaar

$$H_i(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K_i(t) e^{-i\omega t} dt, \tag{4.19}$$

$$2\pi K_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H_i(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \tag{4.20}$$

verknüpft (Cummins (1962)). Mit Hilfe der Impulsantwortfunktion $K_i(t)$ kann durch mathematischer Faltung $(*)$ die Strukturbewegung

$$s_i(t) = \int_{\tau=-\infty}^{\infty} K_i(t-\tau)\zeta(\tau) d\tau, \tag{4.21}$$

direkt aus dem vorausberechneten Seegang (Zeitbereich) für die Ziellokation ermittelt werden. Jacobsen (2005) vereint mit diesem Verfahren die Vorteile der Frequenzbereichsanalyse, die schnell und effektiv zu Ergebnissen führt, mit den Möglichkeiten der Zeitbereichsanalyse, die detaillierte Untersuchungen der Bewegungsabläufe in realen Wellenzügen erlaubt. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 4.4 (rechte Seite, blau unterlegt) skizziert. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Teilschritte des F2T+[4] -Verfahrens wird im Anschluss kurz dargestellt.

[4] *Improved* **F**requency **to T**ime - Domain Method

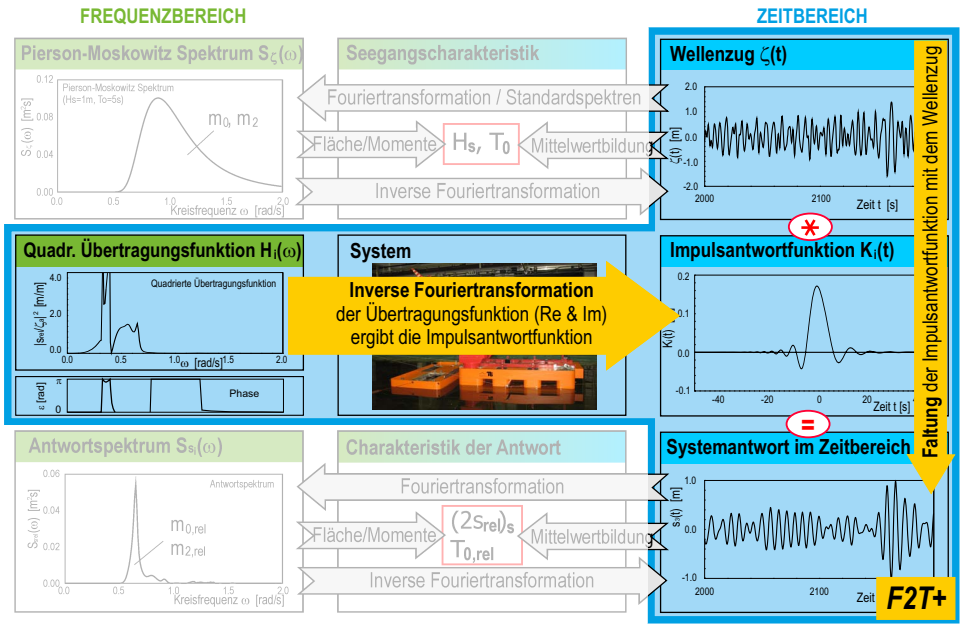

Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des F2T+ -Verfahrens für hydrodynamische Analysen im Zeitbereich ($Wellenzug * IAF = Systemantwort$).

Im Gegensatz zur spektralen Methode erfolgt die Bewegungsvorhersage – nach einmaligem Erzeugen der Impulsantwortfunktionen – ausschließlich im Zeitbereich. Die Systemantwort $s_i(t)$ ergibt sich dabei aus der Faltung $(*)$ des prognostizierten Seegangs $\zeta(t)$ mit der zuvor bestimmten Impulsantwortfunktion $K_i(t)$.

Impulsantwortfunktion

Die IAF $K_i(t)$, auch angegeben als $h(t - t_0)$, beschreibt die Antwort eines linearen Systems auf einen Einheitsimpuls zum Zeitpunkt $t = t_0$. Für ein beliebiges System kann so ein variierendes Eingangssignal $f(t)$ in die entsprechende Systemantwort $g(t)$ direkt im Zeitbereich transformiert werden, wobei Linearität und zeitliche Invarianz des Systems vorausgesetzt werden. Mathematisch kann dies mit Hilfe eines Rechteckimpulses $s_T(t)$

$$s_T(t) = \begin{cases} 1/T & \text{for } |t| \leq T/2 \\ 0 & \text{for } |t| > T/2 \end{cases} \tag{4.22}$$

beschrieben werden (vgl. Abb. 4.5 oben links) mit der Fläche

$$\int_{-\infty}^{\infty} s_T(t)dt = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{1}{T} dt = 1. \tag{4.23}$$

Dieser Eingangsimpuls führt zur Systemimpulsantwort $h_T(t)$. Im Falle einer infinitesimal kleinen Pulsdauer – $T \to 0$ – wird der Initialimpuls un-

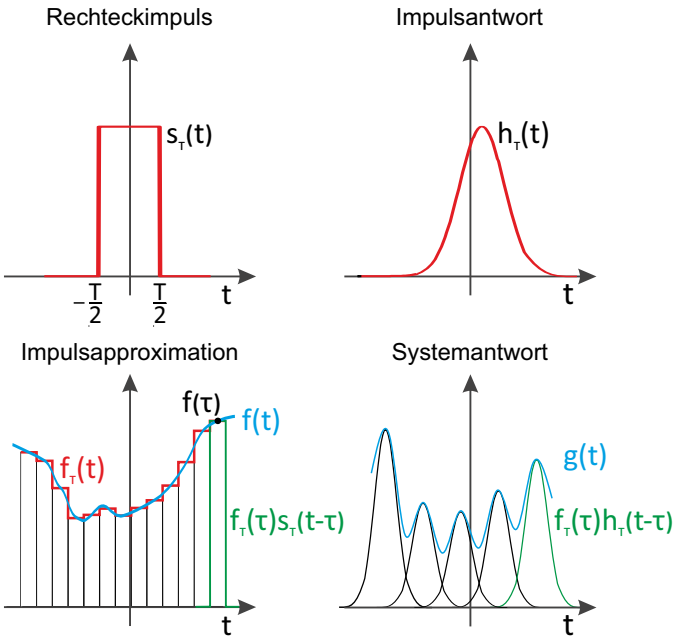

Abbildung 4.5: *Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Rechteckimpuls und Impulsantwort sowie Impulsapproximation und Systemantwort (modifiziert nach Jacobsen (2005)).*

endlich, während die Impulsantwort zu $h(t)$ konvergiert. Diese kann mit der Dirac Delta Funktion (für zeitkonstante Systeme)

$$\delta^*(t) = \begin{cases} \infty & \text{for } t = 0 \\ 0 & \text{for } t \neq 0 \end{cases} \tag{4.24}$$

beschrieben werden und repräsentiert den Grenzfall für die Impulsdauer bei Erhaltung der Integralfläche (vgl. Bronstein et al. (1993)). Die grundsätzliche Idee für den Zusammenhang von Rechteckimpuls und Impulsantwortfunktion ist in Abbildung 4.5 (oben) schematisch dargestellt.

Mit diesem Ansatz kann ein beliebiges Eingangssignal $f(t)$ als Summe von Einzelimpulsen beschrieben werden $f_T(t)$:

$$f(t) \approx f_T(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} f(\tau_i) T s_T(t - \tau_i). \tag{4.25}$$

Um die Systemantwort ($g(t)$) im Zeitbereich zu erhalten kann das Konvolutionsintegral

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) h(t - \tau) d\tau \tag{4.26}$$

benutzt werden, welches die Systemreaktion zum Zeitpunkt t als Superposition aller Systemantworten vorheriger Impulsanregungen zum Zeitpunkt τ mit der Stärke $f(\tau)$ (vgl. Abb. 4.5 unten) interpretiert. Die mathematische Interpretation der Konvolution/Faltung ist eine Funktion auf Basis zweier Eingangsfunktionen,

$$g(t) = f(t) * h(t), \tag{4.27}$$

welche als Produkt dieser Funktionen angesehen werden kann und mit $*$ gekennzeichnet ist.

Im Falle der Bewegungsvorhersage, basierend auf prognostizierten Seegangsdaten und gemäß Gleichung 4.26, kann die Systemantwort $s_i(t)$ im Zeitbereich durch die Konvolution/Faltung der IAF $K_i(t)$ mit dem prognostizierten Seegang $\zeta(t)$ an der Zielposition mit Hilfe von

$$s_i(t) = \int_{\tau=-\infty}^{\infty} K_i(t-\tau) \cdot \zeta(\tau) d\tau \tag{4.28}$$

bestimmt werden. Dies wird als F2T+ -Ansatz bezeichnet (Jacobsen (2005)).

4.3 Bewegungsvorhersage

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 beschrieben, wurde der Kranhalbtaucher Thialf als aussagekräftiges Offshore-Beispielszenario in Interaktion mit einer Transport-Barge gewählt. Abbildung 4.6 zeigt das gewählte Beispielszenario sowie die Umsetzung während der Modellversuche. Die Dimensionen beider Strukturen wurden bereits in Tabelle 3.2 (Kap. 3.3.1) für Original und Modellmaßstab (1:75) aufgeführt. Neben der Analyse der Einzelkörper wird das Mehrkörperverhalten in der abgebildeten Anordnung analysiert. Dabei liegt die Barge leeseitig, quer zum Halbtaucher mit einem Abstand von $15m$. Alle Angaben beziehen sich im Folgenden auf die Großausführung.

Abbildung 4.6: Darstellung der untersuchten Strukturen - Modelle der Barge (links) und des Kranhalbtauchers (rechts) sowie Aufnahme des Mehrkörperszenarios während der Modellversuche (mittig) im Seegangsbecken der TUB.

4.3.1 Numerische Analyse des Systems

Für die numerische Bestimmung der Bewegungsübertragungsfunktionen sind die physikalischen Rahmenbedingungen wie z.B. Abmaße, Massen und Massenträgheitsmomente von elementarer Bedeutung. Die spezifischen Massenverteilungen sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Beide Modelle wurden für die potentialtheoretischen Analysen entsprechend diskretisiert – mit Hilfe von Gitterstudien konnte ein hinreichend feines Gitter mit geringer Panelzahl identifiziert werden, auf welchem alle nachfolgenden Berechnungen beruhen. In Abbildung 4.7 sind die Geometrien beider Modelle in der Mehrkörper-Konfiguration (Halbtaucher ($\beta = 0°$) vor Barge ($\beta = 90°$) bei $15m$ Spalt) entsprechend diskretisiert (Thialf = 1876 Panels, Barge = 1000 Panels) dargestellt.

Tabelle 4.1: Physikalische Masseneigenschaften beider Strukturen.

	m [t]	x_{cg} [m]	z_{cg} [m]	$I_{XX}[kg*m^2]$	$I_{YY}[kg*m^2]$	$I_{ZZ}[kg*m^2]$
Thialf	182.300	80,96	31,08	2,65 E+11	5,54 E+11	5,88 E+11
Barge	54.820	80,61	4,58	2,75 E+10	1,42 E+11	1,67 E+11

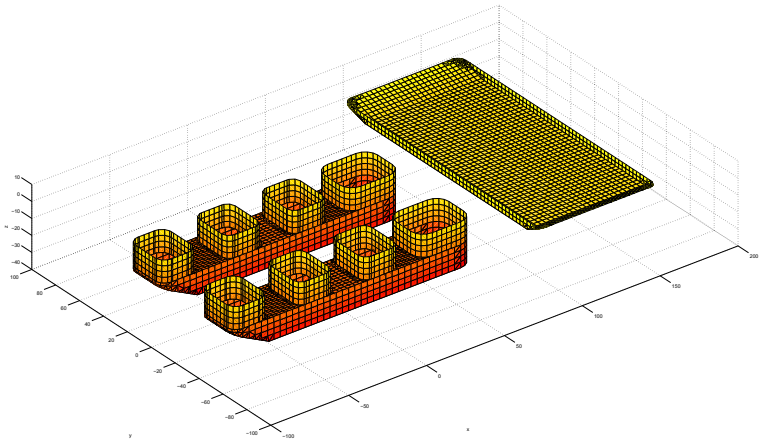

Abbildung 4.7: Diskretisierung beider Modelle in Mehrkörper-Konfiguration, Halbtaucher (1876 Panels) vor Barge (1000 Panels) quer, Spaltweite $15m$, achterlicher Seegang ($\beta = 0°$).

Da die potentialtheoretischen Analysen viskose Effekte nicht berücksichtigen können, werden zusätzliche Dämpfungsterme für die heave-, roll- und pitch-Bewegungen beider Strukturen in die numerischen Berechnungen implementiert. Diese zusätzlichen, viskosen Dämpfungswerte werden dafür experimentell durch Ausschwingversuche ermittelt – die ermittelten, viskosen Dämpfungsterme sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Details zur Ermittlung der jeweiligen Koeffizienten sind in Kapitel 4.1.2 und Anhang A zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Experimentell bestimmte viskose Dämpfungsbeiwerte beider Strukturen.

	$B^*_{33}[kg/s]$	$B^*_{44}[kg * m^2/s]$	$B^*_{55}[kg * m^2/s]$
Thialf	1,89 E+05	2,65 E+09	5,05 E+09
Barge	4,55 E+06	4,92 E+09	3,75 E+10

Mit Hilfe dieser zusätzlichen, viskosen Dämpfungsterme ($B^*_{33}, B^*_{44}, B^*_{55}$) kann die in der Potentialtheorie vernachlässigte viskose Dämpfung für diese Freiheitsgrade mit berücksichtigt werden. Dies hat Einfluss auf die Überhöhung der RAOs im Resonanzbereich sowie Auswirkungen auf die damit verknüpfte Bildung der Impulsantwortfunktionen. Abbildung 4.8 zeigt den Einfluss der Dämpfungsparameter auf die RAOs beider Strukturen für ausgewählte Bewegungen - zu beachten sind vor allem die folgenden Punkte:

- <u>Thialf:</u> Die großen Massen und Rückstellkräfte bewirken zahlreiche und vor allem schwach gedämpfte Schwingungsamplituden. Bei den

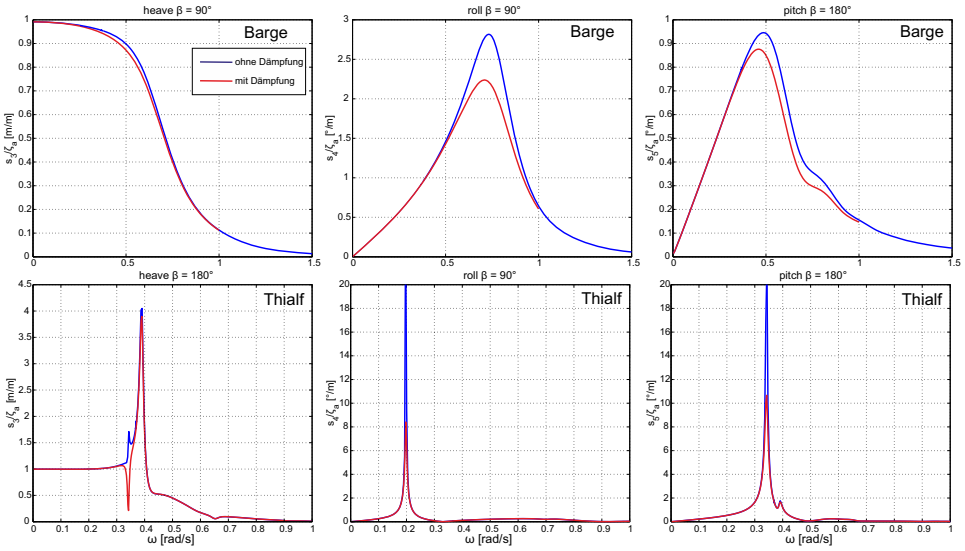

Abbildung 4.8: Auswirkung der zusätzlich implementierten, viskosen Dämpfungsterme auf die Bewegungsübertragungsfunktionen (RAOs) von Barge (oben) und Halbtaucher (unten) für die Tauch-, Roll- und Stampf-Bewegung, mit (rot) und ohne (blau) viskoser Dämpfung.

gezeigten Bewegungen ist der Einfluss der viskosen Dämpfung deutlich sichtbar. Vor allem bei der heave-Bewegung (Tauchen bei $\beta = 180°$) ändert sich die Charakteristik der Heave-Pitch-Kopplung (erster Peak bei $\omega \approx 0,34\,rad/s$) maßgeblich!

- Barge: Der geringe bis vernachlässigbare Einfluss viskoser Dämpfung. Hier war die experimentelle Bestimmung mittels Ausschwingversuchen sehr kompliziert, da es auf Grund hoher Gesamtdämpfung zu nur wenigen und vor allem stark gedämpften Schwingungen kommt. Es wurden zum Teil Vergleiche mit CFD-Simulationen im Zeitbereich angestellt, der Einfluss viskoser Effekte ist hierbei jedoch als sehr gering zu bewerten.

Der Einfluss der implementierten Dämpfung ist vor allem für den Halbtaucher sowie die Roll-Bewegung der Barge relevant – hier reduzieren sich die numerisch überhöhten Resonanzantworten der jeweiligen Freiheitsgrade signifikant. Darüber hinaus kommt es bei $\beta = 180°$ zu einer deutlichen Veränderung der Heave-Pitch-Kopplung (erster Peak bei $\omega \approx 0,34\,rad/s$). Detaillierte Angaben zu den Ausschwingversuchen und der Ermittlung der jeweiligen viskosen Beiwerte sind in Anhang A zusammengetragen.

Abbildung 4.9 vergleicht die numerischen Ergebnisse der Einzel- und Mehrkörperanalyse des Beispielszenarios und stellt den Einfluss des Mehrkörpersystems auf beide Strukturen dar. Es zeigt sich ein starker Einfluss des Kranhalbtauchers auf die Barge, der vor allem auf den enormen Massen-

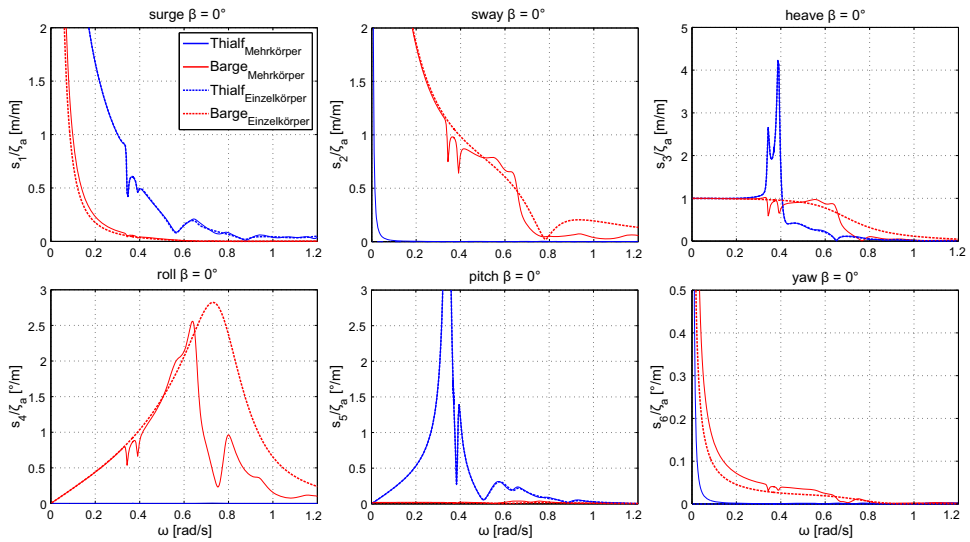

Abbildung 4.9: Vergleich der Einzelkörper- (gestrichelte Linien) und Mehrkörper-RAOs (durchgehende Linien) für das ausgewählte Szenario, Halbtaucher (blau) vor Barge (rot) quer, Abstand $15m$, achterlicher Seegang ($\beta = 0°$).

unterschied beider Strukturen zurückzuführen ist (vgl. Tab. 4.1). Umgekehrt ist kaum eine Beeinflussung des Kranhalbtauchers durch die Barge zu verzeichnen – das Bewegungsverhalten des Kranhalbtauchers bleibt nahezu unverändert. Durch die Leeposition der Barge hinter dem Halbtaucher kommt es bei der Roll-Bewegung zu Abschirmeffekten, d.h. einer Abschwächung des Bewegungsverhaltens - dieser Effekt wird gezielt genutzt und führt zu verringerten Relativbewegungen, welche mögliche Kranoperationen begünstigen.

Hinweis: Die für $\beta = 0°$ nicht angeregten, geraden Bewegungsfreiheitsgrade (s_2, s_4, s_6) des Kranhalbtauchers werden durch die hydrodynamische Kopplung im Mehrkörper-Szenario im niederfrequenten Bereich für sway und yaw (numerisch) mit angeregt. Dies ist vor allem der asymmetrischen Verankerung der Barge hinter dem Kranhalbtaucher geschuldet, welche mit dem Schwerpunkt in der Symmetrieebene des Kranhalbtauchers positioniert ist und somit verschiedene Restangriffsflächen für den einfallenden Seegang bietet (Unterschied der Heck- und Buggeometrien).

Im nächsten Abschnitt werden die numerisch bestimmten Übertragungsfunktionen mit Hilfe von Modellversuchen experimentell validiert.

4.3.2 Experimentelle Validierung der RAOs

Die experimentelle Validierung aller Teilergebnisse findet im Seegangsbecken der TU Berlin statt ($L = 120\,m,\ B = 8\,m,\ T = 1\,m$). Für die Validierung der Einzel- und Mehrkörper-RAOs werden transiente Wellenpakete (TWP) verwendet, welche eine ganzheitliche, spektrale Analyse in nur einem ein-

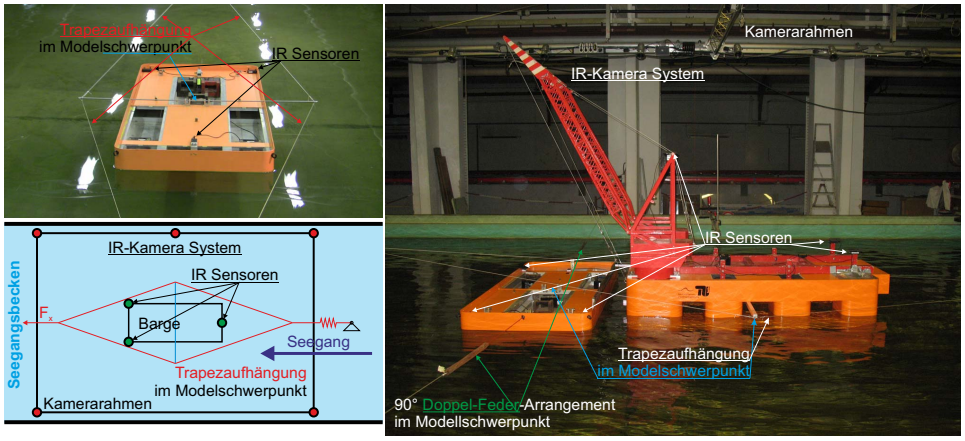

Abbildung 4.10: Veranschaulichung der Modelaufhängung im Seegangsbecken – Trapezaufhängung der Barge im Einzelkörper-Szenario (oben links), kombinierte Modelaufhängung (Trapezaufhängung (Halbtaucher) und Doppel-Feder-Arrangement (Barge)) für das Mehrkörper-Szenario (rechts) sowie schematischer Aufbau der Aufhängung und des Kamerasystems (unten links).

zigen Versuch ermöglichen. Zusätzlich werden reguläre Wellen benutzt, um die Validierung in Bereichen kritischer Frequenzen zu ergänzen. Für die Validierung der Bewegungsvorhersage in natürlichem Seegang werden die in Kapitel 3.3.3, Tabelle 3.5 definierten irregulären Seegänge verwendet. Für Details zur Versuchseinrichtung und den verwendeten experimentellen Analyseverfahren, siehe Kap. 2.1.

Die Modellaufhängung geschieht mit Hilfe einer gefederten, trapezförmigen Schwerpunktsaufhängung, wodurch die relevanten Bewegungsfreiheitsgrade der Strukturen unbeeinflusst bleiben. Für Wellen von vorn ($\beta = 180°$) oder achtern ($\beta = 0°$) bedeutet dies, dass nur die Surge-Bewegungen (Schnellen) eingeschränkt und durch ein Federsystem gedämpft sind. Im Falle quereinlaufenden Seegangs ($\beta = 90°$) wird das Modell in einem Doppel-Feder-Arrangement fixiert, wodurch die Driftbewegung (Quer-Versatz) eingeschränkt und gedämpft ist.

Die Strukturbewegungen –

translatorische Bewegung in:	x-Richtung	$Surge/Schnellen$	[m]
	y-Richtung	$Sway/Driften$	[m]
	z-Richtung	$Heave/Tauchen$	[m]
rotatorische Bewegung um:	x-Achse	$Roll/Rollen$	[°]
	y-Achse	$Pitch/Stampfen$	[°]
	z-Achse	$Yaw/Gieren$	[°]

– werden während der Versuche von einem Infrarot-Kamerasystem (IR) berührungslos erfasst ($\approx 60\,Hz$), welches die Bewegungen der an Bord verteilten IR-LEDs aufzeichnet und verarbeitet.

4.3.2.1 Einzelkörpervalidierung

Zunächst werden die Bewegungsübertragungsfunktionen der Einzelkörper untersucht. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in den Abbildungen 4.11 und 4.12 für alle relevanten Kombinationen aus Welleneinfallswinkel und und Freiheitsgraden für den Halbtaucher bzw. die Barge graphisch zusammengetragen. Dabei spiegeln die blauen Kurven die numerischen Übertragungsfunktionen aus WAMIT, die roten Stern-Kurven die Ergebnisse der Validierung mittels transienter Wellenpakete und die grünen Kreise die Ergebnisse mit Hilfe regulärer Wellen wieder.

Abbildung 4.11 stellt die Übertragungsfunktionen der Barge für die Welleneinfallsrichtungen $\beta = 90°$ (quer einfallender Seegang, oben) und 180° (Seegang von vorn, unten) dar. Auch hier können die numerisch bestimmten Übertragungsfunktionen – und deren Reduzierung im Resonanzbereich (z.B. Roll-Bewegung bei $\beta = 90°$) – experimentell bestätigt werden.

Abbildung 4.12 präsentiert die Übertragungsfunktionen des Halbtauchers für die Welleneinfallsrichtungen $\beta = 0°$ (achterlicher Seegang, oben), 90° (quer einfallender Seegang, mittig) und 180° (Seegang von vorn, unten). Die numerischen Übertragungsfunktionen der jeweilig relevanten Freiheitsgrade werden gut von den transienten Wellenpaketen wiedergegeben. Einzelne kritische Frequenzen können mit Hilfe regulärer Wellen bestätigt werden. Vor allem der in Abbildung 4.8 identifizierte Einfluss der Heave-

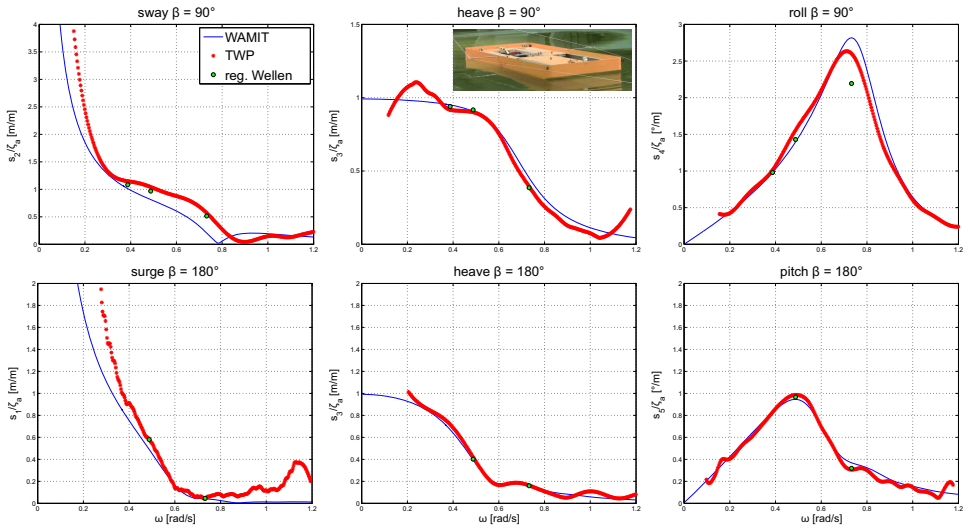

Abbildung 4.11: Validierung der Einzelkörper-RAOs der Barge für $\beta = 90°$ (oben) und 180° (unten). Vergleich der Numerik (blaue Kurven), transienten Wellenpakete (rote Sternkurven) sowie ausgewählter regulärer Wellen (grüne Punkte).

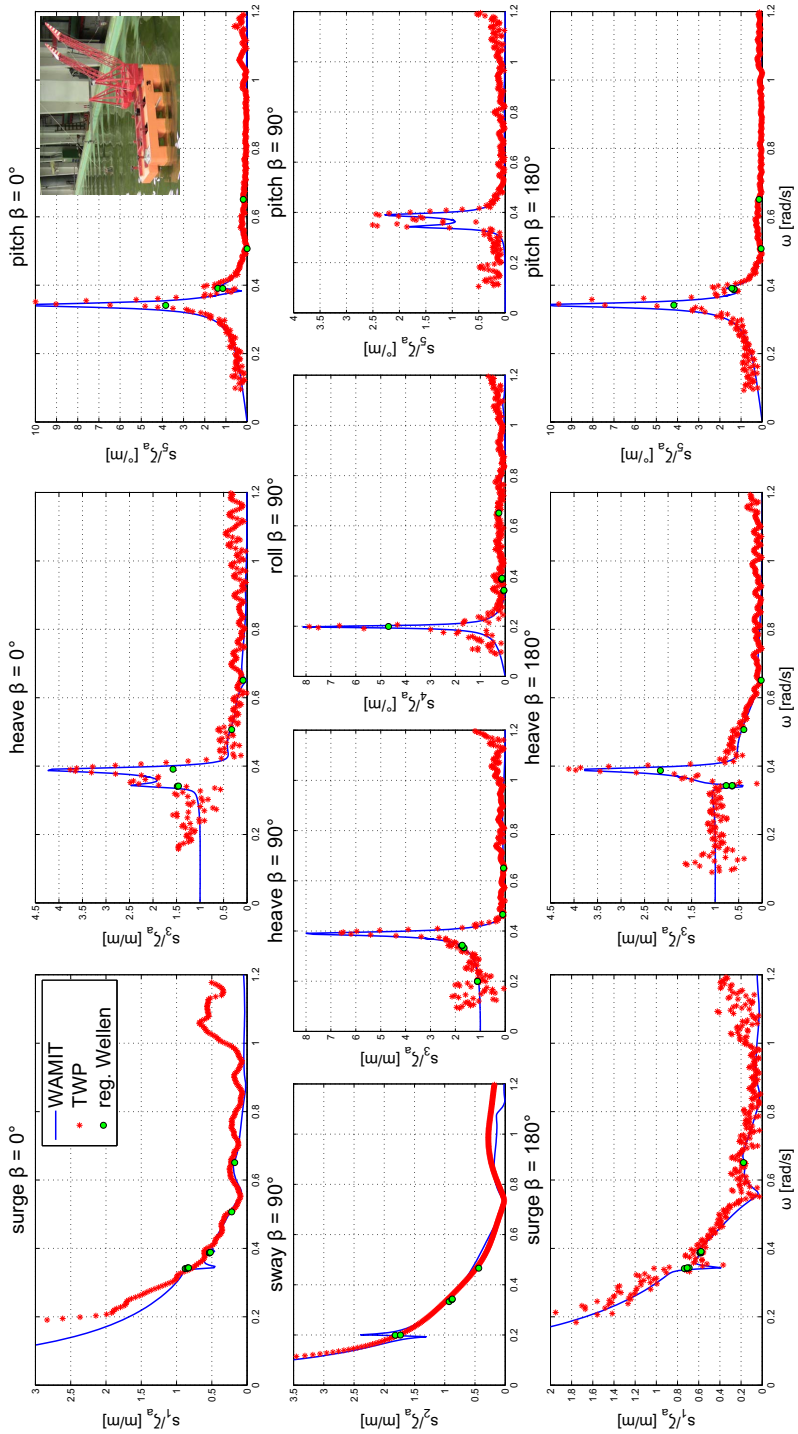

Abbildung 4.12: Validierung der Einzelkörper-RAOs des Kranhalbtauchers Thialf für $\beta = 0°$ (oben), $90°$ (mittig) und $180°$ (unten). Vergleich der Numerik (blaue Kurven) mit Versuchen mit transienter Wellenpaketen (rote Sternkurven) sowie ausgewählten regulären Wellen (grüne Punkte).

Pitch-Kopplung auf die Tauch-Bewegung (bei $\beta = 180°$) durch die zusätzlich implementierten, viskosen Dämpfungsterme kann bei $\omega \approx 0,34\,rad/s$ experimentell bestätigt werden.

Allgemein kann eine hervorragende Übereinstimmung zwischen Numerik und den Ergebnissen aus den Modellversuchen festgestellt werden. Abweichungen im nieder- oder hochfrequenten Bereich sind der Versuchstechnik bzw. der Modellaufhängung (Einschränkung der jeweiligen Surge- und Sway-Bewegungen) zuzuschreiben, können jedoch vernachlässigt werden.

4.3.2.2 Mehrkörpervalidierung

Im Folgenden werden die Mehrkörper-Bewegungsübertragungsfunktionen beider Strukturen validiert, jedoch nur für den Welleneinfallswinkel des ausgewählten Einsatzszenarios, $\beta = 0°$ (achterlicher Seegang). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Barge im Mehrkörperszenario quer zur einfallenden Seegangsrichtung liegt, was den 90°-RAOs für den Einzelkörperfall entspräche.

Abbildung 4.13 zeigt die drei relevanten Bewegungsübertragungsfunktionen (Surge, Heave & Pitch) des Halbtauchers im Mehrkörperszenario inklusive deren Phasen. Auch hier, im Mehrkörperszenario, ist eine hervorragende Übereinstimmung der numerischen und experimentell erzielten Ergebnisse zu erkennen. Mit Ausnahme der Surge-Phase (Einfluss der Mo-

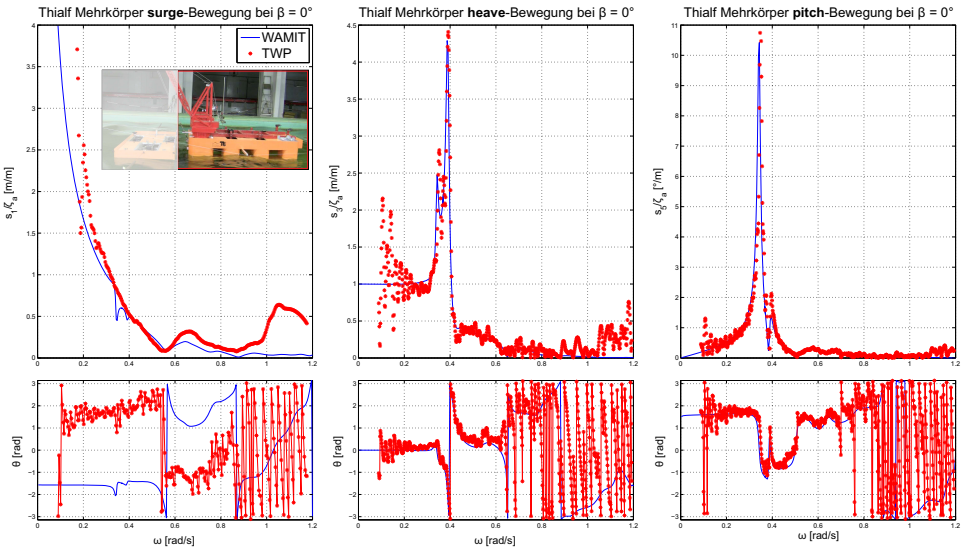

Abbildung 4.13: Validierung der Mehrkörper-RAOs für die relevanten Bewegungsfreiheitsgrade des Kranhalbtauchers (surge, heave & pitch) inklusive der dazugehörigen Phasen: Vergleich der numerisch (blaue Kurven) und der experimentell ermittelten (rote Stern-Kurven) Ergebnisse.

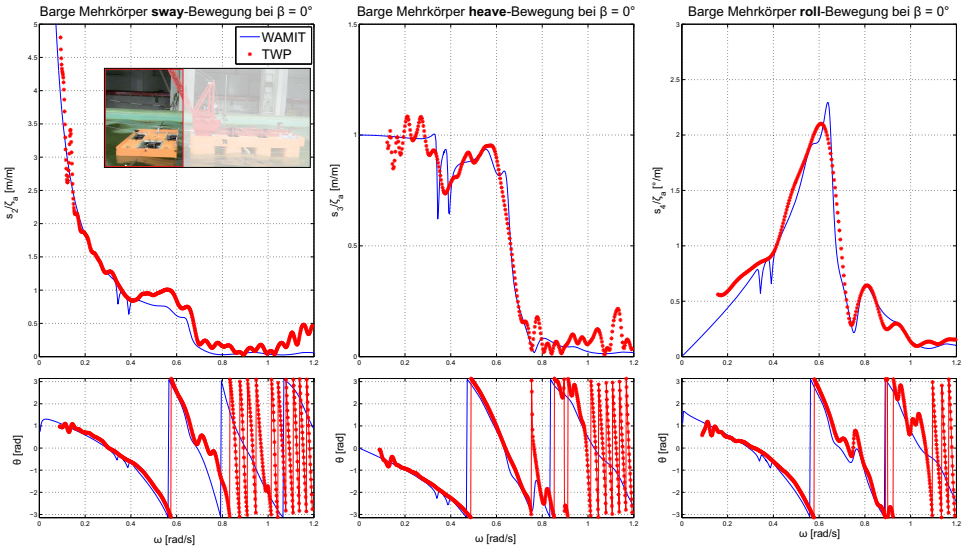

Abbildung 4.14: Validierung der Mehrkörper-RAOs für die relevanten Bewegungsfreiheitsgrade der Barge (sway, heave & roll) inklusive der dazugehörigen Phasen: Vergleich der numerisch (blaue Kurven) und der experimentell ermittelten (rote Stern-Kurven) Ergebnisse.

dellaufhängung) und denen im höherfrequenten Bereich ($\omega \geq 0,8 rad/s$ – Einfluss der Modellversuchstechnik) werden die Phasen der einzelnen RAOs sehr gut wiedergegeben.

Analog dazu zeigt Abbildung 4.14 die drei relevanten Bewegungsübertragungsfunktionen (Sway, Heave & Roll) der Barge im Mehrkörperszenario inklusive deren Phasen. Wieder ist eine hervorragende Übereinstimmung der numerischen und experimentell erzielten Ergebnisse zu verzeichnen. Mit Ausnahme des bereits für den Halbtaucher identifizierten, höherfrequenten Bereiches ($\omega \geq 0,8 rad/s$ – Einfluss der Modellversuchstechnik) werden die Phasen der jeweiligen Bewegungsfreiheitsgrade sehr gut wiedergegeben.

Die validierten Bewegungsübertragungsfunktionen werden im Folgenden für die Generierung der Impulsantwortfunktionen und somit für die Bewegungsvorhersage verwendet. Die akkurate Modellierung der Phasen ist bei der Generierung der IAF von elementarer Bedeutung und geschieht daher auf Basis der numerischen Ergebnisse.

4.3.3 Experimentelle Validierung der Bewegungsvorhersage

Für die Validierung der Bewegungsvorhersage wurden die innerhalb der Seegangsvorhersage definierten, irregulären Seegänge für die Zielposition ungestört gemessen (vgl. Tab. 3.5). Die Parameter der einzelnen, untersuchten Seegänge sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Um das Spektrum der

Tabelle 4.3: Überblick über die experimentell untersuchten irregulären Seegänge.

Nr.	T_P	H_S	ϵ	γ	Nr.	T_P	H_S	ϵ	γ
1				1	Z4	$8,58s$	$7,31m$	$0,2$	6
2		$1,83m$	$0,05$	3	Z5	$9,65s$	$2,31m$	$0,05$	3
3				6	Z6		$6,92m$	$0,15$	3
4				1	Z7	$12,41s$	$3,95m$	$0,05$	3
5		**3,66m**	**0,1**	**3**	Z8		$11,08m$	$0,15$	3
Z1	**8,58s**			6	10		$4,25m$	$0,05$	3
6				1	12	$13,5s$		$0,1$	1
7		$5,48m$	$0,15$	3	13		$8,5m$	$0,1$	3
8				6	14			$0,1$	6
Z2		$7,31m$	$0,2$	1	Z9	$16,23s$	$5,68\ m$	$0,05$	3
Z3				3	Z10	$18,30s$	$6,71\ m$	$0,05$	3

untersuchten Seegänge für die Bewegungsvorhersage der beteiligten Strukturen hinsichtlich der Peak-Periode zu erweitern, wurden zusätzliche irreguläre Seegänge mit $T_P = 9,65\,s$, $12,41\,s$, $16,23\,s$ und $18,3\,s$ untersucht. Die zusätzlichen Seegänge sind mit Zn gekennzeichnet und erweitern die Versuchsreihen auf insgesamt 22 irreguläre Seegänge[5].

Diese Seegänge werden im Rahmen der Bewegungsvorhersage für die Zielkoordinaten mit Hilfe der identifizierten Methoden vorhergesagt/berechnet (HOSM, vgl. Kap. 3) und im Anschluss mit den entsprechenden Impuls-Antwort-Funktionen (IAF) für die Bewegungsvorhersage (F2T+) verwendet.

Um die einzelnen Teilschritte vorerst voneinander entkoppelt analysieren und validieren zu können, werden zunächst die ungestört gemessenen Seegänge aus den Modellversuchen sowie die experimentell ermittelten Strukturbewegungen verwendet:

- Vorhersagebasis: **Modellseegänge** ⇒ Kapitel 4.3.3.1

Mit den somit unabhängig validierten Methoden zur Bewegungsvorhersage (Spektrale sowie F2T+ -Methode) kann im Anschluss die Bewegungsvorhersage auf Basis des in Kapitel 3 prognostizierten Seegangs berechnet und ausgewertet werden:

- Vorhersagebasis: **HOSM Seegangsprognose** ⇒ Kapitel 4.3.3.2

Hierfür werden die IAFs auf Basis der validierten RAOs erstellt – Abbildung 4.15 zeigt die exemplarisch ermittelte IAFs (rechts) auf Basis der zuvor validierten RAOs (links) für den Beispielseegang Nr.5 (vgl. Tab. 4.3, fett gedruckt), welche in Abhängigkeit der Länge des einfallenden Seegangs berechnet werden. Deutliche Unterschiede beider Strukturen sind in der

[5]Die Seegänge Nr.9 und 11 können auf Grund von Messfehlern im optischen Tracking-System nicht ausgewertet werden

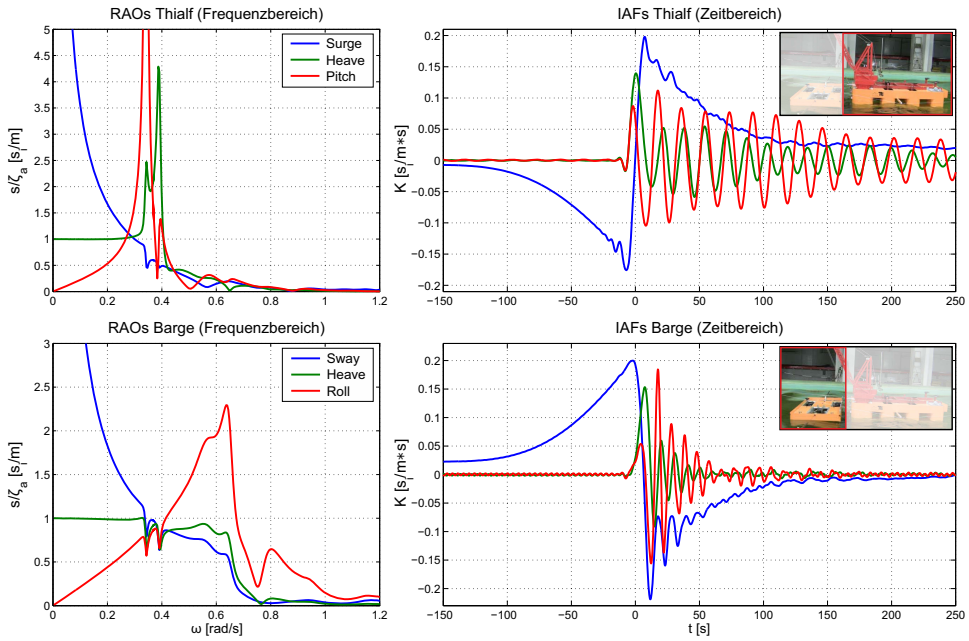

Abbildung 4.15: Relevante Impuls-Antwort-Funktionen (rechts) beider Strukturen auf Basis der zuvor validierten RAOs (links) für Halbtaucher (oben - Surge, Heave & Pitch) und Barge (unten - Sway, Heave & Roll).

„Einwirkdauer“ der IAFs zu erkennen, was in erster Linie auf die extremen Masseneigenschaften des Halbtauchers zurückzuführen ist.

4.3.3.1 Validierung der F2T+ Bewegungsroutine

Für die Validierung der F2T+ Bewegungsroutine werden die experimentell gemessenen Seegänge sowie die entsprechenden Bewegungsübertragungsfunktionen beider Strukturen verwendet (Vorhersagebasis: **Modellseegänge**). Die F2T+ Methode wird dabei mit der Spektralen Methode verglichen und anhand der im Versuch gemessenen Modellbewegungen validiert.

Abbildung 4.16 zeigt exemplarisch die Auswertung der Zeitreihen des Halbtauchers im Beispielseegang Nr.5 (vgl. Tab. 4.3 und 4.4). Die erste Zeile zeigt den ungestört gemessenen Seegang. In den nächsten Zeilen folgen die relevanten gemessenen und berechneten Strukturbewegungen – die Surge, Heave & Pitch-Bewegungen. Dabei stellen die blauen Graphen die gemessenen Strukturbewegungen, die grünen die Ergebnisse der Spektralen Methode und die roten die der F2T+ Methode dar.

Analog dazu zeigt Abbildung 4.17 die Auswertung der Zeitreihen der Barge für den selben Seegang. Die erste Zeile zeigt wieder den ungestört gemessenen Seegang, in den nächsten Zeilen folgen die relevanten gemes-

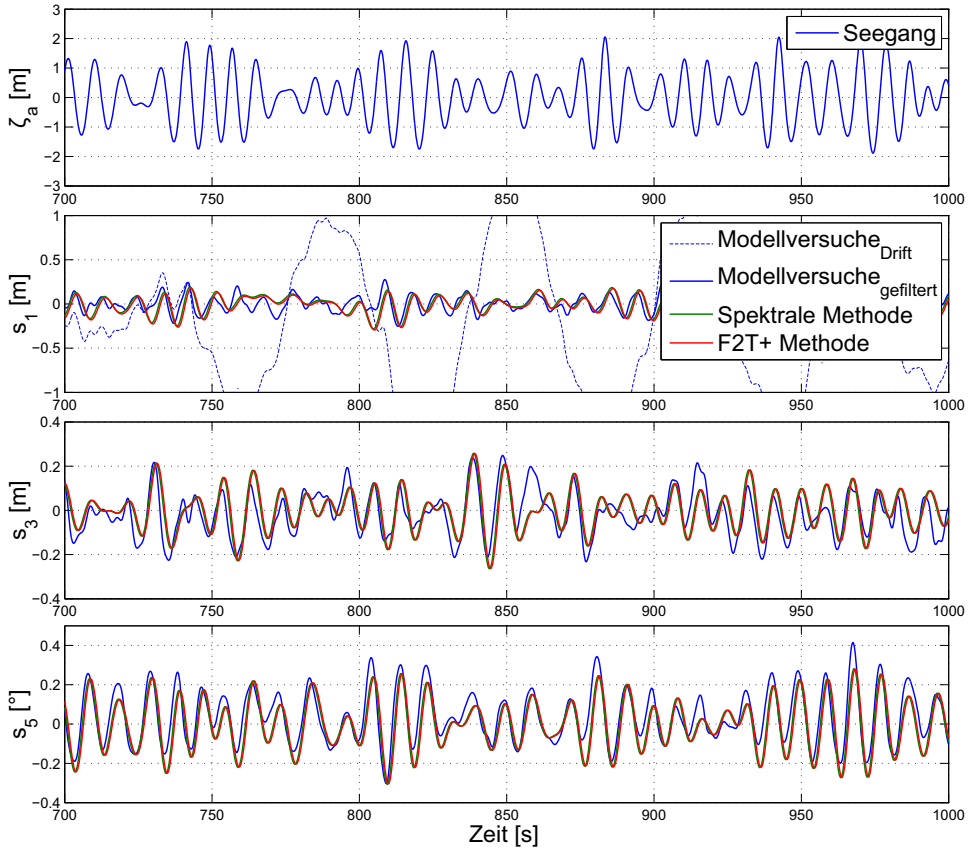

Abbildung 4.16: Auswertung der Bewegungsvorhersage des **Halbtauchers** im Mehrkörperszenario für den irregulären Seegang Nr.5 ($T_P = 8,58s, H_S = 3,66m, \gamma = 3$) bei $\beta = 0°$ an der Ziellokation ($x = 4125m$) auf Basis der gemessenen Seegänge. Zeile 1: gemessener, ungestörter Seegang; Zeile 2-4: vorhergesagte Surge-, Heave- und Pitch-Bewegung – Modellversuche (blau), Spektrale Methode (grün) sowie F2T+ Methode (rot) mit $\rho = 0,76; 0,76; 0,82$ (vgl. Tab. 4.4).

senen und berechneten Strukturbewegungen – die Sway, Heave & Roll-Bewegungen.

Die Ergebnisse mittels Spektraler Methode (grüne Kurven) sind nahezu identisch zu denen des F2T+-Verfahrens (rote Kurven), was die Anwendbarkeit der F2T+ -Methode rein numerisch bestätigt. Der Vergleich zu den in den Modellversuchen gemessenen Strukturbewegungen bestätigt die Methode generell.

Die Surge-Bewegungen des Halbtauchers sowie die Sway-Bewegungen der Barge weisen niederfrequente Bewegungsamplituden während der Modellversuche auf (blaue gestrichelte Linien), welche dem tieffrequenten Abdriften der Strukturen im Seegang in Kombination mit der verwendeten Modellaufhängung geschuldet sind. Diese nichtlinearen, gedämpften Bewegungsre-

striktionen werden von der Numerik innerhalb der Bewegungsübertragungsfunktionen nicht erfasst. Die resultierenden, starken Systemauslenkungen in den betroffenen Freiheitsgraden (Surge bzw. Sway) können für die Validierung durch geeignetes, niederfrequentes Filtern entfernt werden. Die resultierenden, „Drift-bereinigten“ Systemantworten (durchgehende blaue Linien) werden von der F2T+-Methode gut bzw. sehr gut wiedergegeben.

Allgemein lässt sich für die Bewegungsvorhersage des Halbtauchers und der Barge eine ausreichend gute bzw. sehr gute Übereinstimmung feststellen. Der minimal zeitliche Versatz der Strukturantwort ist auf die Sway-Bewegung im Modellversuch zurückzuführen. Diese führt zu einer abweichenden Ziellokation, welche daher auch ein verändertes Wellenbild und somit Strukturbewegungen beinhaltet. Lineare Anpassungen dieser positi-

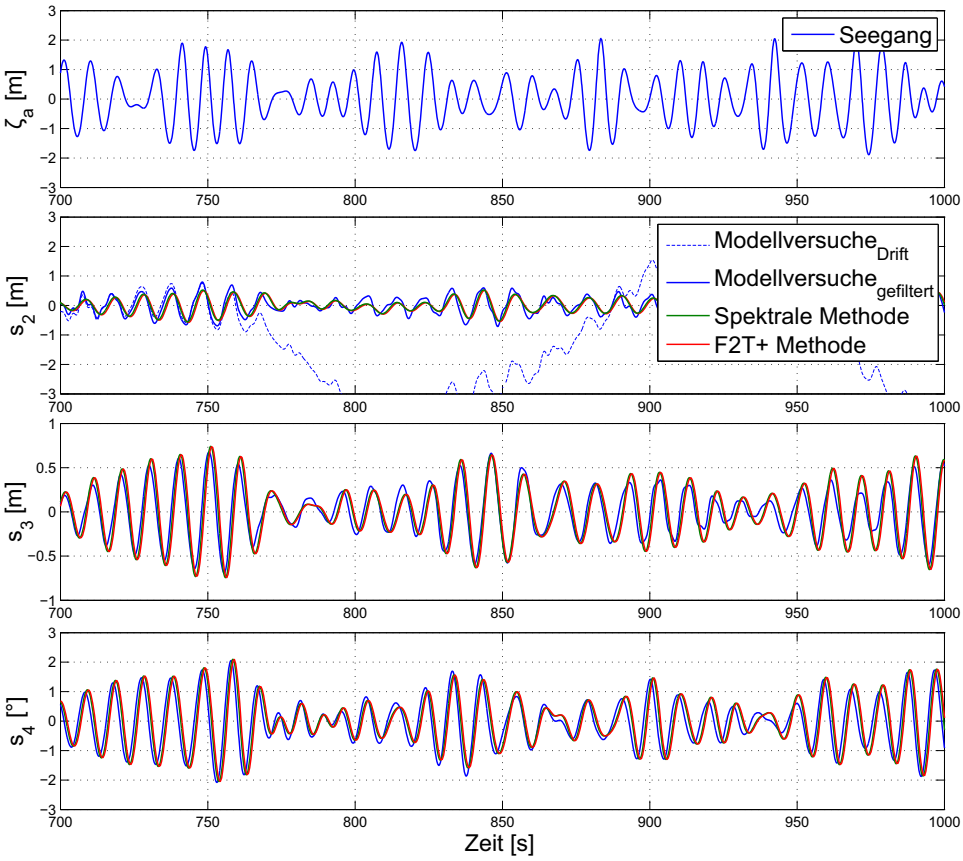

Abbildung 4.17: Auswertung der Bewegungsvorhersage der **Barge** im Mehrkörperszenario für den irregulären Seegang Nr.5 ($T_P = 8,58s, H_S = 3,66m, \gamma = 3$) bei $\beta = 0°$ an der Ziellokation ($x = 4125m$) auf Basis der gemessenen Seegänge. Zeile 1: gemessener, ungestörter Seegang; Zeile 2-4: vorhergesagte Sway-, Heave- und Roll-Bewegung – Modellversuche (blau), Spektrale Methode (grün) sowie F2T+ Methode (rot) mit $\rho = 0,47; 0,96; 0,96$ (vgl. Tab. 4.4).

onsbedingten Veränderung der Struktur zum Zielseegang wurden numerisch untersucht und führen zu sehr guten Ergebnissen.

Die Ergebnisse der Analysen sind für beide Strukturen in Tabelle 4.4 zusammengefasst, wobei die Bewertung der Bewegungsvorhersage mit Hilfe des in Kapitel 2.3 eingeführten Kreuzkorrelationsfaktors ρ geschieht. Hinweis: die Bewertung der Surge- bzw. Sway-Bewegung beider Strukturen erfolgt zunächst für die originalen, driftbehafteten Versuchsergebnisse, was zu reduzierten Kreuzkorrelationswerten führt.

Auf Basis dieser umfangreichen Auswertung können verschiedene Tendenzen in Abhängigkeit der einzelnen Seegangsparameter abgeleitet werden. Abbildung 4.18 stellt den Einfluss der Peakperiode T_P (links oben), der signifikanten Wellenhöhe H_S (rechts oben), der Wellensteilheit ϵ (links unten) sowie des Form-/Vergrößerungsfaktors γ (unten rechts) grafisch dar. Dabei lässt sich generell eine verbesserte Vorhersagbarkeit der Strukturbewegungen für lange Wellen mit niedriger Wellenhöhe und somit geringer Steilheit feststellen. Kleine Vergrößerungsfaktoren stellen ebenfalls einen begünstigenden

Tabelle 4.4: Bewertung der Bewegungsvorhersage beider Strukturen für ausgewählte, irreguläre Seegänge an der Ziellokation ($x = 4125m$) – beste Übereinstimmung bei $\rho = 1$ (siehe Kapitel 2.3); Vorhersagebasis: **Modellseegänge**.

Vorhersagebasis: **Modellseegänge**					ρ **Thialf**			ρ **Barge**		
#	T_P [s]	H_S [m]	ϵ	γ	Surge	Heave	Pitch	Sway	Heave	Roll
1				1	0,56	0,70	0,85	0,68	0,96	0,97
2		1,83	0,05	3	0,81	0,72	0,89	0,70	0,96	0,98
3				6	0,82	0,75	0,91	0,61	0,96	0,98
4				1	0,75	0,78	0,84	0,79	0,97	0,97
5		**3,66**	**0,1**	**3**	**0,76**	**0,76**	**0,82**	**0,47**	**0,96**	**0,96**
Z1	**8,58**			6	0,84	0,79	0,84	0,36	0,95	0,96
6				1	0,73	0,81	0,75	0,54	0,95	0,94
7		5,48	0,15	3	0,79	0,79	0,78	0,36	0,93	0,92
8				6	0,79	0,79	0,78	0,36	0,93	0,92
Z2				1	0,71	0,79	0,87	0,47	0,93	0,92
Z3		7,31	0,2	3	0,71	0,78	0,86	0,42	0,89	0,87
Z4				6	0,65	0,73	0,84	0,44	0,87	0,85
Z5	9,65	2,31	0,05	3	0,80	0,74	0,87	0,88	0,97	0,97
Z6		6,92	0,15	3	0,69	0,79	0,86	0,59	0,92	0,92
Z7	12,41	3,95	0,05	3	0,85	0,85	0,82	0,95	0,99	0,98
Z8		11,08	0,15	3	0,79	0,72	0,74	0,71	0,88	0,85
10		4,25	0,05	3	0,88	0,84	0,88	0,93	0,98	0,98
12	13,5			1	0,87	0,76	0,74	0,90	0,95	0,94
13		8,5	0,1	3	0,87	0,70	0,74	0,82	0,95	0,93
14				6	0,88	0,67	0,78	0,71	0,95	0,92
Z9	16,23	5,68	0,05	3	0,89	0,83	0,85	0,87	0,97	0,97
Z10	18,3	6,71	0,05	3	0,92	0,86	0,79	0,85	0,97	0,97
				durchschnittlich	0,79	0,77	0,82	0,66	0,95	0,94
				global		**0,79**			**0,85**	

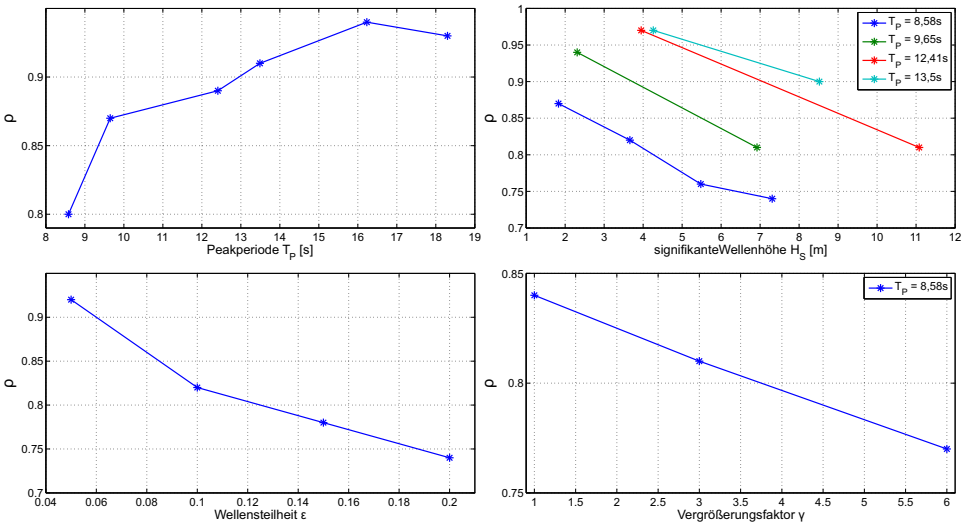

Abbildung 4.18: Einfluss verschiedener Seegangsparameter auf die Prognosegüte ρ (Kreuzkorrelation) für die Strukturbewegungen (Barge): Einfluss der Peakperiode T_P (links oben), der signifikanten Wellenhöhe H_S (rechts oben), der Wellensteilheit ϵ (links unten) sowie des Vergrößerungsfaktors γ (unten rechts – auf Basis der Seegänge mit $T_P = 8,58s$ (Seegänge 1-Z4)).

Faktor dar, was insgesamt auf eine bessere Vorhersagbarkeit für lineare Wellensysteme hindeutet.

4.3.3.2 Validierung der Bewegungsvorhersage

Mit der validierten F2T+ Bewegungsroutine wird im Folgenden die ganzheitliche Bewegungsvorhersage evaluiert. Diese wird auf Basis des in Kapitel 3 vorhergesagten Seegangs mittels F2T+ -Verfahren durchgeführt und das Gesamtergebnis anhand von Modellversuchen validiert (Vorhersagebasis: **HOSM Seegangsprognose**). Die segmentweise Vorhersage des Seegangs geschieht dabei mit dem erweiterten semi-experimentellen Ansatz – Abgleich des Wellenzuges nahe am Wellenblatt (1125 m) mittels waveTUB sowie experimentelle Validierung des mittels HOSM prognostizierten Seegangs für die Zielposition (4125 m) bei zyklisch aktualisierte Schnappschüsse der Wasserspiegelauslenkung im Ortsbereich.

Abbildung 4.19 zeigt die Validierung eines segmentweise prognostizierten Seegangs (Zeile 1 – analog zur segmentweisen Vorhersage in Abb. 3.18 - 3.21, Kap. 3.4.2) im Zeitbereich an der Ziellokation. Der exemplarisch gewählte Beispielseegang, der irreguläre Seegang Nr.2 ($T_P = 8,58s, H_S = 1,83m, \gamma = 3$ – siehe Tab. 4.5), stellt auf Grund seiner moderaten Peak-Periode bei gleichzeitig geringer Wellenhöhe ein plausibles Operationsszenario für das gewählte Mehrkörpersystem dar. Basierend auf der HOSM-Seegangsprogno-

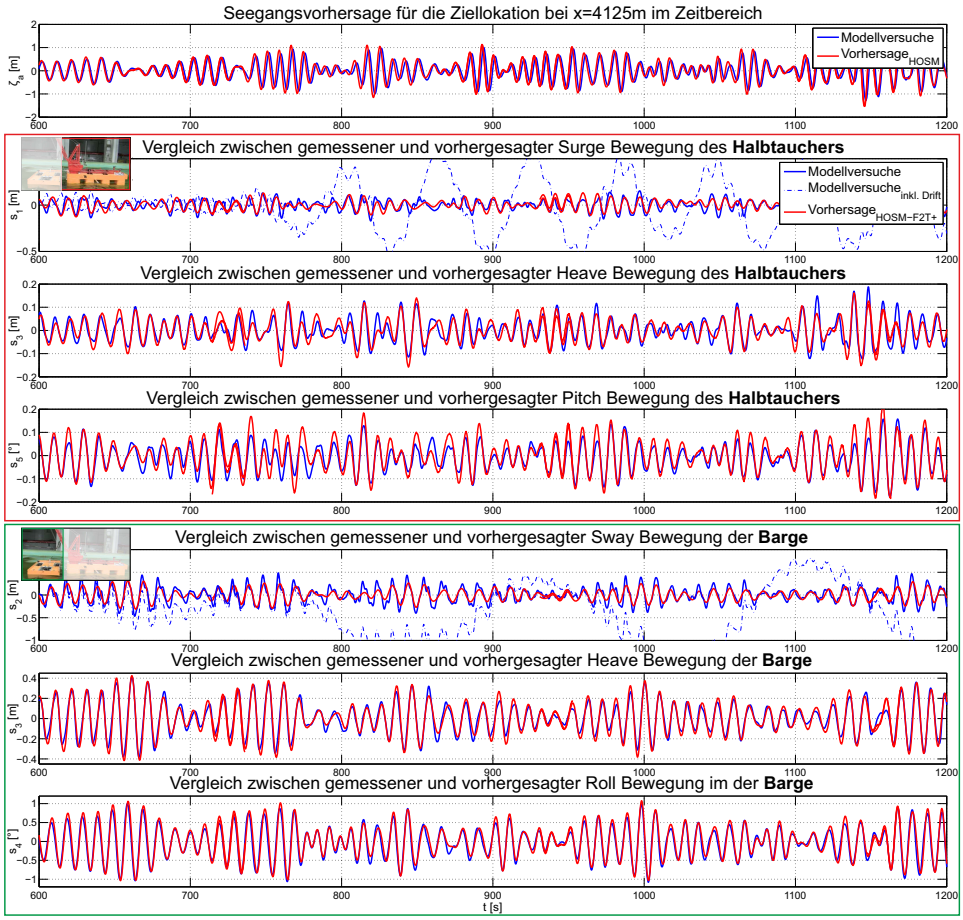

Abbildung 4.19: Validierung der Seegangs- und Bewegungsvorhersage für beide Strukturen im Mehrkörperszenario: Abbildung des mittels HOSM segmentweise prognostizierten Seegangs (Zeile 1 – irregulärer Seegang Nr.2, ($T_P = 8,58s, H_S = 1,83m, \gamma = 3$)) sowie der resultierenden Surge-, Heave- und Pitch-Bewegung des Halbtauchers (Zeile 2-4) sowie der Sway-, Heave- und Roll-Bewegung der Barge (Zeile 5-7) für die Ziellokation ($x = 4125m$ bei $\beta = 0°$), numerisch ermittelt (rot – F2T+) und experimentell (blau) validiert.

se erfolgt die Validierung der sukzessiv prognostizierten Surge-, Heave- und Pitch-Bewegung des Halbtauchers (Zeile 2-4, roter Block) sowie der Sway-, Heave- und Roll-Bewegung der Barge (Zeile 5-7, grüner Block) für die Ziellokation ($x = 4125m$ bei $\beta = 0°$) – die numerischen Ergebnisse (rot) werden durch Modellversuche (blau) validiert.

Analog zu Abbildung 4.19 zeigt Abbildung 4.20 die segmentweise Bewegungsvorhersage für den irregulären Seegang Nr. 13 ($T_P = 13,5s, H_S = 8,5m, \gamma = 3$). Dieser stellt auf Grund seiner Wellenhöhe ein Extremszenario dar, welches Kranoperationen nicht zulässt und daher rein methodisch, zusätzlich bewertet wird. Die Seegangsvorhersage bestimmt mit $\rho_{HOSM} =$

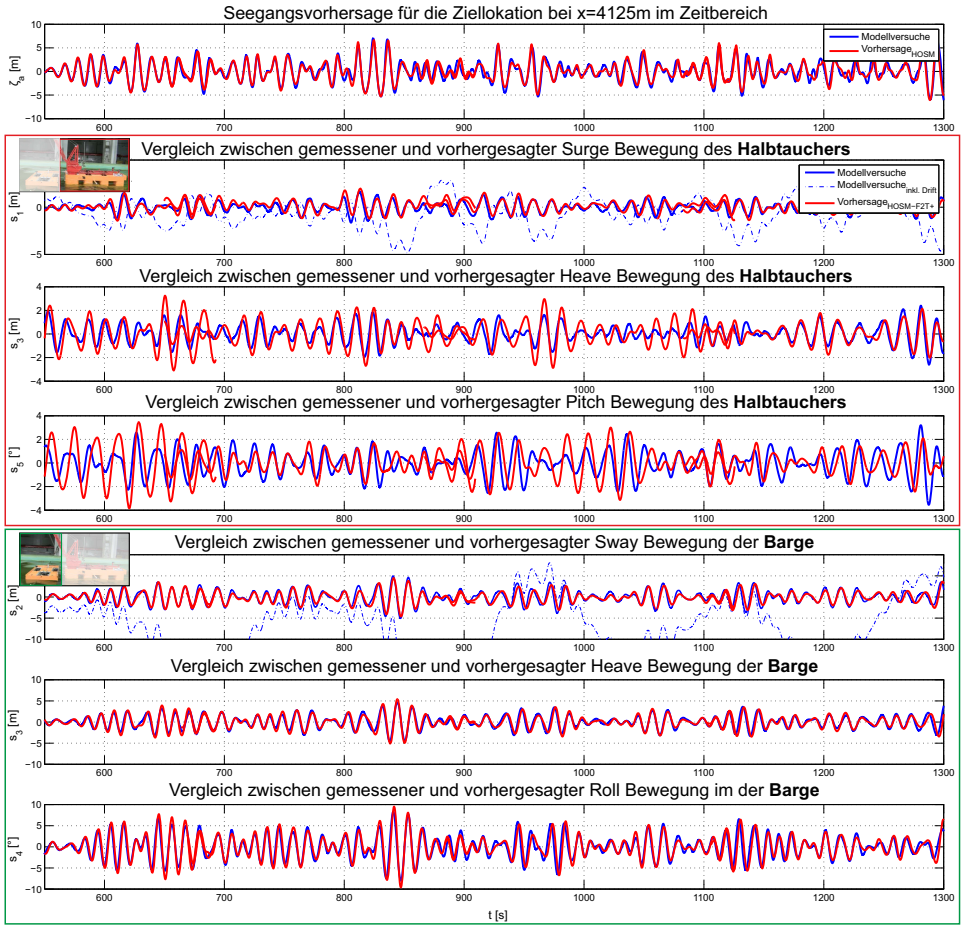

Abbildung 4.20: Validierung der Seegangs- und Bewegungsvorhersage für beide Strukturen im Mehrkörperszenario: Abbildung des mittels HOSM segmentweise prognostizierten Seegangs (Zeile 1 – irregulärer Seegang Nr. 13, ($T_P = 13,5s, H_S = 8,5m, \gamma = 3$)) sowie der resultierenden Surge-, Heave- und Pitch-Bewegung des Halbtauchers (Zeile 2-4) sowie der Sway-, Heave- und Roll-Bewegung der Barge (Zeile 5-7) für die Ziellokation ($x = 4125m$ bei $\beta = 0°$), numerisch ermittelt (rot – F2T+) und experimentell (blau) validiert.

$0,96$ bzw. $SSP_{HOSM} = 0,14$ den einlaufenden Seegang seht gut. Die darauf basierenden, segmentweise prognostizierten Strukturbewegungen weisen jedoch stark verkürzte Vorhersagebereiche auf, was vor allem beim Halbtaucher im Vergleich der überlappenden Prognosebereiche zu sehen ist. Generell ist eine abnehmende Prognosequalität für extreme Seegänge zu verzeichnen – vor allem für den Kranhalbtaucher, resultierend aus dem identifizierten nichtlinearen Bewegungsverhalten in hohen Wellen.

Für die systematische Evaluierung wurden insgesamt 8 Beispielseegänge

Tabelle 4.5: Bewertung der Bewegungsvorhersage beider Strukturen für ausgewählte, irreguläre Seegänge an der Ziellokation ($x = 4125m$) – beste Übereinstimmung bei $\rho = 1$ bzw. $SSP = 0$ (siehe Kapitel 2.3); Vorhersagebasis: **HOSM Seegangsprognose**.

Vorhersagebasis: **HOSM**						**Thialf**			**Barge**		
#	$T_P[s]$	$H_S[m]$	ϵ	γ	Güte	Surge	Heave	Pitch	Sway	Heave	Roll
1	**8,58**	**1,83**	**0,05**	1	ρ	0,78	0,68	0,86	0,90	0,97	0,98
					SSP	0,34	0,40	0,27	0,28	0,12	0,10
2				**3**	ρ	**0,78**	**0,67**	**0,87**	**0,87**	**0,97**	**0,98**
					SSP	**0,34**	**0,39**	**0,26**	**0,31**	**0,14**	**0,11**
5	8,58	3,66	0,1	3	ρ	0,74	0,70	0,85	0,92	0,97	0,98
					SSP	0,37	0,38	0,26	0,22	0,13	0,11
8	8,58	5,48	0,15	3	ρ	0,76	0,74	0,79	0,92	0,97	0,96
					SSP	0,35	0,35	0,43	0,24	0,13	0,15
10	13,5	4,25	0,05	3	ρ	0,91	0,87	0,92	0,97	0,97	0,98
					SSP	0,21	0,26	0,28	0,14	0,12	0,11
12	**13,5**	**8,5**	**0,1**	1	ρ	0,88	0,87	0,83	0,95	0,95	0,94
					SSP	0,25	0,31	0,37	0,17	0,16	0,17
13				**3**	ρ	**0,87**	**0,85**	**0,83**	**0,95**	**0,95**	**0,94**
					SSP	**0,25**	**0,33**	**0,38**	**0,17**	**0,15**	**0,17**
14				6	ρ	0,90	0,81	0,84	0,94	0,95	0,93
					SSP	0,23	0,36	0,38	0,18	0,16	0,19
durchschnittlich					ρ	0,83	0,78	0,85	0,93	0,96	0,96
					SSP	0,29	0,35	0,33	0,22	0,14	0,14
global					ρ	**0,817**			**0,950**		
					SSP	**0,322**			**0,164**		

(vier mit kurzer und vier mit langer Peak-Periode) hinsichtlich der resultierenden Strukturbewegungen von Halbtaucher und Barge analysiert und bewertet. Analog zur Evaluierung der prognostizierten Seegänge in Abschnitt 3.4, wird die Güte der Prognostizierbarkeit mittels Kreuzkorrelation (ρ) und, zusätzlich, dem Surface Similarity Parameter (SSP) verglichen. Für den in Abbildung 4.19 untersuchten, irregulären Seegang Nr. 2 ergibt sich mit $SSP = 0,330$ und $\rho = 0,774$ für den Halbtaucher sowie $SSP = 0,184$ und $\rho = 0,938$ für die Barge eine ausreichend gute beziehungsweise sehr gute Übereinstimmung der durchschnittlichen, prognostizierten Strukturbewegungen. Die Bewertung der einzelnen, prognostizierten Strukturbewegungen sind für alle untersuchten Seegänge für Halbtaucher und Barge in Tabelle 4.5 zusammengetragen.

Die globalen Güteparameter für die Vorhersagbarkeit der Strukturbewegungen unterstreicht die generelle Anwendbarkeit der Bewegungsvorhersage und somit auch des ganzheitlichen Vorhersagesystems. Mit den aufbereiteten Modellversuchsergebnissen (beseitigter Einflusses der Modellaufhängung etc.) kann für beide Strukturen eine sehr gute Prognostizierbarkeit auf Basis des numerisch vorhergesagten Seegangs erreicht werden.

4.3.3.3 Abschätzung der Vorhersagezeiten

Für die Abschätzung des effektiven Vorhersagenutzens muss der zeitliche Aufwand aller Teilprozesse für die Bewegungsvorhersage berücksichtigt wer-

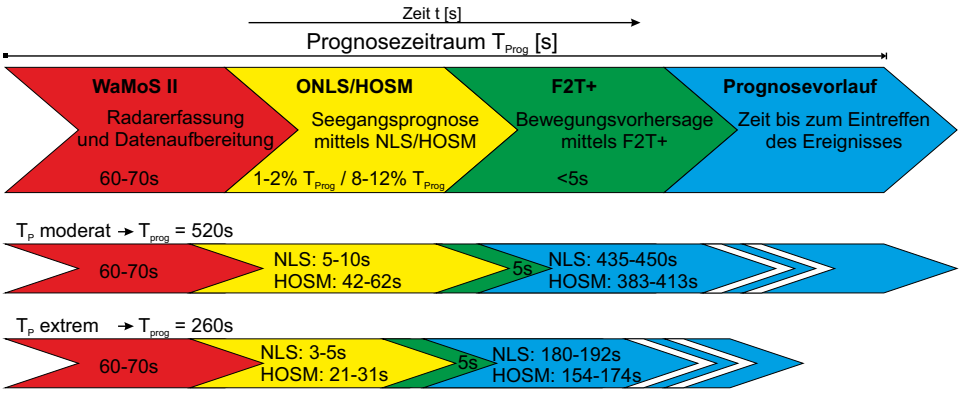

Abbildung 4.21: Visualisierung der Rechen- und Vorhersagezeiten auf Basis ausgewählter moderater und extremer Vorhersageszenarien – unskalierte Darstellung.

den. Abbildung 4.21 visualisiert diese Abschätzung auf Basis ausgewählter Vorhersageszenarien (vgl. Kapitel 3.4.2.3). Hierbei werden Prognosezeiträume von $520\,s$ und $260\,s$ für moderate bzw. extreme Vorhersageszenarien erzielt.

Für die Seegangserfassung und deren Datenaufbereitung mittels WaMoS® II müssen circa $60 - 70\,s$ Verarbeitungszeit eingerechnet werden. Die Seegangsprognose benötigt, je nach verwendeter Methode, $1 - 2\%$ (NLS) bzw. $8 - 12\%$ (HOSM) des Prognosezeitraums für die Berechnung. Die Ermittlung der resultierenden Strukturantworten auf Basis der zuvor generierten IAF wird konservativ mit $5\,s$ bemessen.

Diese quantitativen Rechenzeitabschätzungen ermöglichen eine effektive Vorhersage (Prognosevorlauf) von $7 - 7,5$ (NLS) bzw. $6 - 6,5$ (HOSM) Minuten für moderate Einsatzszenarien. Für extreme Seegangsbedingungen reduziert sich die realisierbare Vorhersage auf circa 3 (NLS) bzw. $2,5$ (HOSM) Minuten, in Abhängigkeit der verwendeten Prognosemethode.

Auf Basis der konservativ abgeschätzten Vorhersagemöglichkeiten des entwickelten Systems zur Seegangs- und Bewegungsvorhersage lassen sich Operationssicherheit und Wirtschaftlichkeit für die in der Zielstellung definierten Offshore Operationen – Kran-Operationen, Hubschrauber Landungen, Offshore LNG-Transfer u.v.m. – signifikant steigern.

4.3.4 Anwendung der Bewegungsvorhersage

Aufbauend auf den guten bzw. sehr guten Prognoseergebnissen sollen abschließend exemplarisch die vertikalen Relativbewegungen – relevant für mögliche Lift-Off Kran-Operationen – auf Basis eines mittels HOSM bestimmten Beispielseegangs vorhergesagt werden. Für die Berechnung wird ein zentraler Lastangriffspunkt auf der Barge gewählt, von welchem der Kranhalbtaucher eine Last anhebt und somit gekoppelte Relativbewegun-

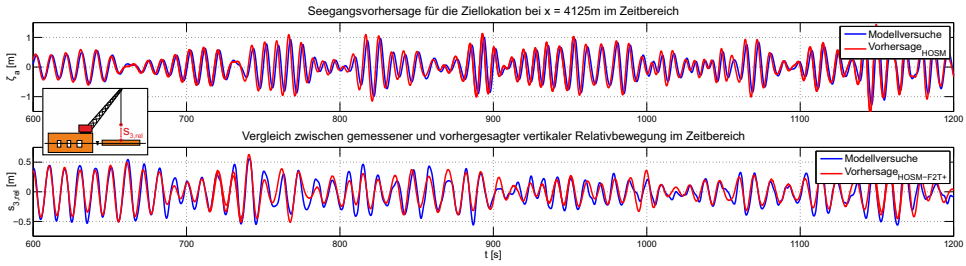

Abbildung 4.22: Validierung der prognostizierten, vertikalen Relativbewegung für das Mehrkörperszenario: Abbildung des mittels HOSM prognostizierten Seegangs (Zeile 1 – irregulärer Seegang Nr. 2, $(H_S = 1,83m, T_P = 8,58s, \gamma = 3)$) sowie der resultierenden vertikalen Relativbewegung (Zeile 2) für die Ziellokation ($x = 4125m$ bei $\beta = 0°$), numerisch ermittelt (rot – F2T+) und experimentell (blau) validiert ($SSP = 0,225$ und $\rho = 0,903$).

gen aus den jeweils überlagerten translatorischen und rotatorischen Einzelbewegungen entstehen. Abbildung 4.22 zeigt die prognostizierte vertikale Relativbewegung ($s_{3,rel}$, unten) an der Zielposition ($x = 4125m$ bei $\beta = 0°$) für den mittels HOSM vorhergesagten irregulären Seegangs Nr.2 $(H_S = 1,83m, T_P = 8,58s, \gamma = 3)$, welche mit $SSP = 0,225$ und $\rho = 0,903$ eine gute Prognostitionsgüte aufweist.

Auf Basis dieser Prognose stellt Abbildung 4.23 mögliche Einsatzbereiche grafisch dar, welche die zulässigen Relativbewegungen – maxima-

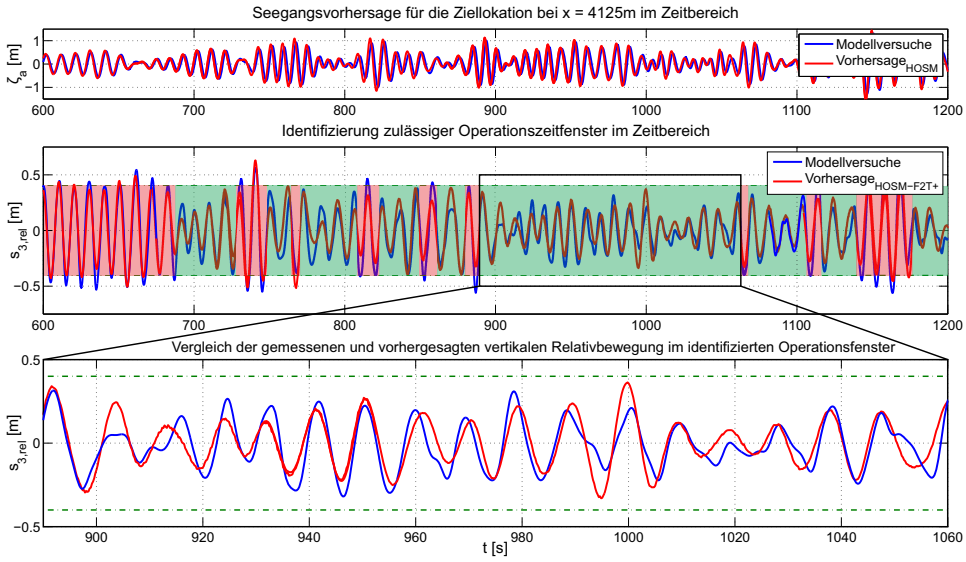

Abbildung 4.23: Identifizierung möglicher Operationsfenster in Abhängigkeit maximal zulässiger relativer Vertikalbewegungen an der Zielposition ($x = 4125m$ bei $\beta = 0°$) auf Basis des prognostizierten irregulären Seegangs Nr.2 ($H_S = 1,83m, T_P = 8,58s, \gamma = 3$).

le, relative Vertikalbewegungen $s_{3,rel} = [-0.4\,m \;\; 0.4\,m]$ – des gekoppelten Mehrkörpersystems nicht überschreiten. Die obere Teilabbildung zeigt erneut den mittels HOSM prognostizierten irregulären Seegang Nr.2. Die mittlere Teilabbildung zeigt die identifizierten Operationszeitfenster, in welchen zulässige Operationsbedingungen (grün hinterlegt) herrschen. Die unterste Teilabbildung stellt den selektierten Operationsbereich ab $t \approx 900\,s$ dar, welcher eine potentielle Kranoperation für circa $150\,s$ ermöglicht.

Dieses exemplarische Anwendungsbeispiel für das analysierte Fallbeispiel unterstreicht die generelle Anwendbarkeit des entwickelten, deterministischen Bewegungsvorhersagesystems für jegliche Offshore Operationen – sowohl für Kranoperationen in moderaten Seegangsbedingungen, als auch für kritische Operationen in extremen Seegängen (Hubschrauberlandungen etc.). Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die HOSM für die Seegangsvorhersage hervorragend geeignet ist, da die Genauigkeit in nahezu allen Anwendungsbereichen sehr gut ist. Die Vorhersagequalität der untersuchten Fallbeispiele ist global hinreichend gut, um bei industriellen Anwendungen sowohl Wirtschaftlichkeit als auch Sicherheit bei Offshore-Operationen zu erhöhen.

Kapitel 5

Schlussfolgerungen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines deterministischen Entscheidungshilfesystems für kurzzeitige Offshore-Operationen in Form einer nichtlinearen Seegangs- und Bewegungsvorhersage. Das System beruht auf der beschriebenen, radarbasierten Seegangserfassung mittels WaMoS® II und besteht aus den beiden Kernkomponenten nichtlinearer Seegangs- sowie Bewegungsvorhersage, welchen der Fokus dieser Arbeit gilt.

Für die Seegangsvorhersage sind zwei nichtlineare numerische Methoden eingeführt worden: die NLS-Gleichung und die HOS Methode. Der große Vorteil nichtlinearer Verfahren gegenüber der linearen Theorie ist die Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen, wodurch wichtige nichtlineare Effekte berücksichtigt werden. Dadurch kann das Ausbreitungsverhalten des Seegangs, insbesondere bei steileren Seegängen oder reduzierten Wassertiefen, realistischer und somit korrekt ermittelt werden. Gegenüber Theorien höherer Ordnung zeichnen sich beide Verfahren durch eine geringere Berechnungsdauer aus, wobei die NLS-Gleichung – auf Grund der linearisierten Vereinfachungen – signifikant schneller im Vergleich zur HOS Methode ist [1].

Die NLS-Gleichung beruht auf der Annahme, dass die Wellensteilheit und die spektrale Bandbreite klein sind. Die dadurch signifikant vereinfachte Beschreibung der Wasserwellenausbreitung, welche bis zur 2. Ordnung entwickelt wurde, bringt neben dem Vorteil der schnellen Berechenbarkeit den Nachteil einer spektral einheitlichen Trägerfrequenz mit sich – dadurch werden die eigentlich frequenzabhängigen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten grob vereinheitlicht und somit in den Randbereichsfrequenzen über- bzw. unterschätzt. Die Prognose natürlichen Seegangs ist somit für breitbandige Spektren fehlerbehaftet.

Die HOS Methode zeichnet sich dagegen durch eine höhere Genauigkeit

[1] $\leq 5\,s$ Rechenzeit der NLS-Gleichung gegenüber $15-30\,s$ der HOSM bei vergleichbaren Prognoseszenarien.

aus, da dass Randwertproblem der Wellenausbreitung bis zur 4. Ordnung entwickelt wurde. Sie ist zwar geringfügig langsamer als die NLS-Gleichung, aber immer noch schnell genug, um den Seegang in einem ausreichenden Zeitraum vor Eintreffen der Welle an der Struktur vorherzusagen.

Die Versuche im Seegangsbecken der TUB haben ergeben, dass beide Verfahren gute bis sehr gute Ergebnisse für kleine Wellenhöhen ($\epsilon \leq 0.05$) erzielen. Für steilere Seegänge ergibt die HOSM im Vergleich zur NLS-Gleichung mit zunehmender Steilheit signifikant bessere Ergebnisse. Insgesamt zeigte sich, dass die HOSM ein sehr effektives Verfahren ist, um komplexe Seegänge über lange Zeiträume und Distanzen akkurat und schnell zu simulieren. Die Unterschiede zwischen NLS-Gleichung und HOSM in der Vorhersagequalität sind dabei teilweise so signifikant, dass die HOSM der NLS-Gleichung für eine Seegangsvorhersage vorzuziehen ist.

Trotzdem bietet die NLS-Gleichung aufgrund ihrer signifikant kürzeren Berechnungsdauer eine gute Simulationsbasis. Die zunehmende Ungenauigkeit der NLS-Simulationen bei steileren Wellengruppen basiert hauptsächlich auf der zugrunde liegenden linearen Dispersionsgleichung. Da moderate Wellengruppen grundsätzlich gut erfasst werden können und lediglich ein zeitlicher Versatz die Simulationsgüte reduziert, könnten seegangsabhängige Korrekturparameter hierbei einen entscheidenden Rechenvorteil bei gleichbleibend geringen Simulationszeiten liefern. Vor allem in Hinblick auf mögliche 3D-Simulationen – welche nochmals einen erheblichen Mehraufwand an Rechenleistung und Zeit beanspruchen – gilt die NLS daher weiter als vielversprechendes Prognoseverfahren.

Für die in dieser Arbeit definierten Ziele zeigte sich, dass die HOSM für die Seegangsvorhersage prädestiniert ist, da die Genauigkeit in einem großen Anwendungsbereich sehr gut ist. Die Vorhersagequalität der untersuchten Fallbeispiele war durchweg hinreichend gut bis sehr gut, um bei einer industriellen Anwendung sowohl Wirtschaftlichkeit als auch Sicherheit bei Offshore-Operationen zu erhöhen.

Eine problemorientierte Anwendung wäre in der Kombination beider Methoden denkbar. Hierbei wird die schnelle und hinreichend genaue NLS-basierte Lösung für die „in situ“ Machbarkeitsentscheidung möglicher Operationen vor Ort verwendet. Werden Wellengruppen detektiert, welche ein Operationskriterium überschreiten, so kann mit Hilfe der genaueren, etwas langsameren HOSM-Berechnung wenig später die genaue Amplitude der Systemantwort sowie deren Eintreffen korrekt bestimmt und über den weiteren Operationsvorgang entschieden werden.

Für die Bewegungsvorhersage wurde das F2T+ Verfahren, eine Weiterentwicklung der Impulsantwortfunktionen, auf Basis der zuvor prognostizierten Seegangssequenzen angewendet. Somit können beliebige Strukturen und Mehrkörpersysteme unter Berücksichtigung der hydrodynamischen

Kopplung zeitnah (wenige Sekunden) ausschließlich im Zeitbereich analysiert werden, ohne den Umweg über Zeitschrittverfahren gehen zu müssen. Ähnlich der Seegangsvorhersage sind die Ergebnisse der Bewegungsvorhersage hinreichend gut bis sehr gut – die Anwendbarkeit des entwickelten Entscheidungshilfesystems konnte damit bewiesen werden.

Die zur Vorhersage erforderlichen Teilschritte konnte im Rahmen dieser Arbeit ermittelt und validiert werden. Das hydrodynamische Verhalten von Einzelkörpern und gekoppelten Mehrkörpersystemen konnte numerisch ermittelt und experimentell erweitert werden. Die der Bewegungsvorhersage zugrunde liegenden Bewegungsübertragungsfunktionen konnten präzise bestimmt und vollständig validiert werden. Die validierten Einzel- und Mehrkörper-RAOs bilden die Basis für die IAFs und die nachfolgende Bewegungsvorhersage.

Die prinzipielle Anwendbarkeit der F2T+ -Methode konnte im Vergleich zur Spektralen Methode bestätigt werden. Validierungen in Einzel- und Mehrkörperszenarien unterstreichen die Zuverlässigkeit der analysierten Methode. Ganzheitliche Bewegungsvorhersagen für moderate und extreme Seegangsbedingungen sowie ein exemplarisches Anwendungsbeispiel – simulierter Hubvorgang während einer Offshore Kranoperation – verdeutlichen und bestätigen die Anwendbarkeit des entwickelten Entscheidungshilfesystems.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die vorgestellten Methoden die kontinuierliche deterministische Vorhersage des eintreffenden Seegangs sowie der zu erwartenden Strukturbewegungen ermöglichen. Der Vorhersagehorizont ist dabei abhängig von der Schnappschusslänge des Radars sowie den vorherrschenden Seegangsparametern. In den präsentierten Fallbeispielen konnten Vorhersagehorizonte mit $520\,s$ und $260\,s$ erzielt werden, je nach Validierungsszenario (moderate bzw. extreme Seegangsbedingungen). In Bezug auf die Einsatzbedingungen für das gewählte Szenario – Offshore Kranoperation – bietet die Vorhersage bei realisierbaren Einsatzbedingungen in Form moderater Peak-Perioden ausreichend große Prognosezeiträume $\geq 520\,s$. Für extreme Seegänge reduziert sich die Prognoseweite auf Grund der erhöhten Ausbreitungsgeschwindigkeit nachlaufender Einzelwellen. Die realisierbaren Prognosezeiträume bieten dennoch hinreichend viel Handlungsspielraum für seegangsbasierte Operationsentscheidungen. Konservative Rechenzeitabschätzungen ergeben eine effektive Vorhersage von $7-7,5$ (NLS) bzw. $6-6,5$ (HOSM) Minuten für moderate Einsatzszenarien. Für extreme Seegangsbedingungen reduziert sich die realisierbare Vorhersage auf 3 (NLS) bzw $2,5$ (HOSM) Minuten, in Abhängigkeit der verwendeten Prognosemethode.

Ausblick

Nach der erfolgreichen Validierung des Vorhersagesystems für Seegang und Strukturbewegungen bei idealen, kontrollierbaren Bedingungen im Seegangsbeckens der TUB ist der nächste Schritt die Anwendung des Verfahrens auf natürlichen Seegang unter realistischen Bedingungen – eine Großausführungsvalidierung. Dafür werden die Teilsysteme Seegangserfassung und Seegangsvorhersage kombiniert, wodurch eine reale Anwendung simuliert werden kann. Für diese Untersuchungen sollen Daten der Forschungsplattform FINO 1 ausgewertet werden, welche über ein WaMoS® II System mit aktueller Auswertetechnik verfügt und Validierungsdaten für den eintreffenden Seegang bietet.

In Bezug auf den zu analysierenden Seegang sollen 2D- und 3D-Transects (Schnitte) evaluiert werden, um den Einfluss kurzkämmigen Seegangs zu bewerten. Aufgrund der höheren Genauigkeit der HOS Methode soll die Großausführungsvalidierung vorrangig mit dieser Methode durchgeführt werden. Radarinvertierung und Seegangsdatenerfassung werden hierfür mit den optimalen Einstellungen bzw. mit der aktuellsten Technik (VV-Antenne) und Auswerteverfahren verwendet.

Einfluss der Kurzkämmigkeit: Hierfür wurde der zu berechnende Seegang sowohl mittels 2D-Transects als auch zweidimensional im Ortsbereich simuliert. Es zeigte sich deutlich, dass 3D-Simulationen die Genauigkeit der Vorhersage erheblich verbessert, allerdings auf Kosten der Simulationsdauer.

Seegangsvorhersage im Zeitbereich: Für die Extrahierung einer Registrierung im Zeitbereich aus Radarsnapshots müssen fortlaufende Radarmessungen über einen langen Zeitraum ($\geq 5\,min$) verfügbar sein. Die Erzeugung der Registrierung im Zeitbereich aus Oberflächenauslenkungskarten erfolgte mittels „overlapping“ der fortlaufenden Bildsequenzen. Das heißt, dass pro Invertierung aus der zeitlich mittleren Oberflächenauslenkung die Wasserspiegelauslenkung im Zeitbereich für einen vordefinierten Ort ermittelt wird. Danach wird der zeitlich älteste Snapshots der Invertierung aussortiert und durch einen Snapshots des folgenden Zeitschritts ersetzt. Mit der so zusammengesetzten Sequenz der Oberflächenauslenkung kann die Wasserspiegelauslenkung an einem vordefinierten Ort im Zeitbereich ermittelt werden.

Die Zeitbereichsuntersuchungen beinhalten einerseits die Variation der Anzahl der Snapshots pro Invertierung und andererseits die Verwendung von 2D- und 3D-Transects. Es zeigte sich, dass eine Erhöhung der Snapshots pro Invertierung die Simulationsgenauigkeit verbessert. In Bezug auf die Simulationsdauer ist aber die Standardprozedur (32 Snapshots/Invertierung)

deutlich schneller und liefert dennoch eine akzeptable Simulationsgenauigkeit.

3D Vorhersage: Im Laufe der Untersuchung zeigte sich, dass die 3D-Simulation von natürlichem Seegang der 2D-Simulation überlegen ist. Insgesamt bestätigt sich, dass eine Vorhersage des natürlichen Seegangs nur mit der 3D-Simulation des Seegangs ausreichend genaue Ergebnisse für eine erfolgreiche kommerzielle Anwendung liefert. Hinsichtlich der Berechnungszeit ist die 3D-Simulation ($\approx 65\%$ der Vorhersagezeit) signifikant langsamer als die 2D-Simulation ($\approx 12\%$ der Vorhersagezeit). Erste Untersuchungen zeigten jedoch, dass eine Optimierung der Seegangserfassung (Overlapping via VV-Radar), der Software (Parallelisierung) und der Hardware (Rechencluster) die Rechendauer signifikant reduzieren kann.

In Hinsicht auf den signifikant gesteigerten Rechenaufwand könnte eine modifizierte Variante der NLS-Gleichung (seegangsabhängige Korrekturparameter für linearisierten Ansatz) für die 3D-Simulation moderater Seegänge eine entscheidende Rolle spielen.

Literaturverzeichnis

Akhmediev, N., Ankiewicz, A., and Taki, M. (2009). Waves that appear from nowhere and disappear without a trace. *Physics Letters A, 373(6)*, pages 675–678.

Akhmediev, N., Eleonskii, V., and Kulagin, N. (1987). Exact first-order solutions of the nonlinear schrödinger equation. *Theoretical and Mathematical Physics, 72(2)*, pages 809–818.

Benjamin, T. and Feir, J. (1967). The disintegration of wave trains on deep water. *Journal of Fluid Mechanics, Vol. 27(3)*, pages 417–430.

Blondel, E., Ducrozet, G., Bonnefoy, F., and Ferrant, P. (2008). Deterministic reconstruction and prediction of a non-linear wave field using probe data. In *OMAE 2008 - 27th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Estoril, Portugal.

Bronstein, I., Semendjajew, K., and Musiol, G. (1993). *Taschenbuch der Mathematik*. G. Grosche & V. Ziegler, 1. edition.

Clauss, G. and Bergmann, J. (1986). Gaussian wave packets - a new approach to seakeeping tests of ocean structures. In *Applied Ocean Research, Vol.8 (No.4)*.

Clauss, G. and Klein, M. (2009). The New Year Wave: Spatial Evolution of an Extreme Sea State. *JOMAE 2009 - Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 131(4).

Clauss, G. and Klein, M. (2011). The new year wave in a seakeeping basin: Generation, propagation, kinematics and dynamics. *Ocean Engineering*, 38(14â€“15):1624 – 1639.

Clauss, G., Klein, M., Dudek, M., Hessner, K., and Hilmer, T. (2015a). PrOWOO - Prognose Optimaler Wetterfenster für Offshore Operationen. *Tagungsband der Statustagung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*, pages 81–95.

Clauss, G., Klein, M., Dudek, M., and Onorato, M. (2014). Application of Higher Order Spectral Method for Deterministic Wave Forecast. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, San Francisco, CA, USA.

Clauss, G., Klein, M., Dudek, M., and Onorato, M. (2015b). Deterministic Non-Linear Wave Forecast and Motion Prediction for Short-Term Offshore Operations. In *Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Kona, Big Island, Hawaii, USA.

Clauss, G., Kosleck, S., Sprenger, F., and Boeck, F. (2009a). Adaptive Stretching of Dynamic Pressure Distribution in Long- and Short-Crested Seas. In *OMAE2009-79485, Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, USA.

Clauss, G., Kosleck, S., and Testa, D. (2009b). Cash- decision support system for computer aided ship handling. In *In Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Hamburg, Germany.

Clauss, G., Kosleck, S., Testa, D., and Hessner, K. (2008). Forecast of critical situations in short-crested seas. In *OMAE 2008 - 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, San Diego, USA.

Clauss, G., Kosleck, S., Testa, D., and Stück, R. (2007). Forecast of critical wave groups from surface elevation snapshots. In *OMAE 2007 - 26th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, San Diego, USA.

Clauss, G., Lehmann, E., and Östergaard, C. (1992). *Offshore Structures*, volume 1: Conceptual Design and Hydrodynamics. Springer Verlag London.

Clauss, G. F., Klein, M., Dudek, M., and Onorato, M. (2012). Application of Breather Solutions for the Investigation of Wave/Structure Interaction in High Steep Waves. In *OMAE 2012 - 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil. OMAE2012-83244.

Clauss, G. F., Klein, M., and Onorato, M. (2011). Formation of Extraordinarily High Waves in Space and Time. In *OMAE 2011 - 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rotterdam, The Netherlands. OMAE2011-49545.

Clauss, G. F. and 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), Vol. III*, pages 368–375, Brest, France.

Clauss, G. F. and 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.

Cummins, W. (1962). The Impulse Response Function and Ship Motions. *Schiffstechnik*, Band 9(Heft 47):101–109.

Davis, M. C. and Zarnick, E. E. (1964). Testing ship models in transient waves. In *5th Symposium on Naval Hydrodynamics.*

Dommermuth, D. G. and Yue, D. K. P. (1987). A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 184:267 – 288.

Faltinsen, O. and Michelsen, F. (1974). Motion of large Structures in Waves at zero Froude number. In *Symposium on the dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves.*

Faulkner, D. (2000). Rogue Waves – Defining their Characteristics for Marine Design. In *Rogue Waves 2000*, Brest, France.

Grafoner, P. (1989). Ballastautomatik für das größte Kranschiff der Welt. *Schiff und Hafen*, 5.

Haver, S. and Anderson, O. J. (2000). Freak Waves: Rare Realization of a Typical Population or Typical Realization of a Rare Population? In *Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, pages 123–130, Seattle, USA.

Hennig, J. (2005). *Generation and Analysis of Harsh Wave Environments.* PhD thesis, TU Berlin.

Hessner, K., Hillmer, T., and Parsa, A. (2015). Improved low sea state estimates from VV-polarized X-Band nautical radar. In *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.*

Iseki, T. (2009). Real-time Estimation of Directional Wave Spectra using non-stationary Ship Motion Data. In *28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.*

Its, A. R. and Kotljarov, V. P. (1976). Explicit formulas for solutions of a nonlinear Schrödinger equation. *Doklady Akademii Nauk Ukrainy, Vol. SSR Ser. A. v1051*, pages 965–968.

Jacobsen, K. (2005). Hydrodynamisch gekoppelte mehrkörpersysteme im seegang – bewegungssimulationen im frequenz- und zeitbereich. *Dissertation,* Technische Universität Berlin (D 83).

Karjanto, N. and van Groesen, E. (2007). Derivation of the NLS Breather Solutions using Displaced Phase-Amplitude Variables. In *Proceedings of SEAMS-GMU Conference*.

Kühnlein, W. L. (1997). *Seegangsversuchstechnik mit transienter Systemanregung*. PhD thesis, TU Berlin.

Kjeldsen, S. P. (1990). Breaking Waves. In Tørum, A. and Gudmestad, O., editors, *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Water Wave Kinematics*, pages 453–473, Molde, Norway. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. NATO ASI Series, Series E - Volume 178.

Klein, M. (2015). *Tailoring Critical Wave Sequences for Response-Based Design*. PhD thesis, Dissertation, Technische Universität Berlin (D83).

Kosleck, S. (2013). *Prediction of Wave-Structure Interaction by Advanced Wave Field Forecast*. PhD thesis, Dissertation, Technische Universität Berlin (D83).

Kuznetsov, E. (1977). Solitons in a parametrically unstable plasma. *In Akademiia Nauk SSSR Doklady, Vol. 236*, pages 575–577.

Ma, Y. (1979). The perturbed plane-wave solutions of the cubic schrödinger equation. *Studies in Applied Mathematics, 60*, pages 43–58.

Steinhagen, U. (2001). Synthesizing Nonlinear Transient Gravity Waves in Random Seas. *Dissertation, Technische Universität Berlin (D83)*.

Mei, C. (1989). *The applied dynamics of ocean surface waves*, volume 1 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific, 2 edition.

Mori, N., Yasuda, T., and Nakayama, S. (2000). Statistical Properties of Freak Waves Observed in the Sea of Japan. In *Proceedings of the 10th Interational Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Vol. III*, pages 109–122, Seattle, USA.

Naaijen, P. and Huijsmans, R. (2008). Real time wave forecasting for real time ship motion predictions. In *OMAE 2008 - 27th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Estoril, Portugal.

Naaijen, P. and Huijsmans, R. (2010). Real Time Prediction of Second Order Wave Drift Forces for Wave Force Feed Forward in DP. In *OMAE 2010 - 29th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Shanghai, China.

Naaijen, P., van Dijk, R., Huijsmans, R., and El-Mouhandiz, A. A. (2009). Real Time Esti-mation of Ship Motions in Short Crested Seas. In *OMAE 2009 - 28th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Honolulu, USA.

Newman, J. (1977). *Marine Hydrodynamics.* The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Newman, J. (2001). Wave Effects on Multiple Bodies. In *Hydrodynamics in Ship and Ocean Engineering*, pages 3–26, RIAM Kyushu University, Japan.

Newman, J. and Lee, C.-H. (2001). Boundary-Element Method in Offshore Structure Analysis. In *20th Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pages 3–26, RIAM Kyushu University, Japan.

Nielsen, U. D. and Iseki, T. (2010). Estimation of Sea State Parameters From Measured Ship Responses: The Bayesian Approach With Fixed Hyperparameters. In *28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.*

Ohkusu, M. (1974). Hydrodynamic forces on multiple cylinders in waves. In *Symposium on the dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves.*

Ohkusu, M. (1976). Ship Motions in Vincinity of a Structure. In *1st international Conference on the Behaviour of Offshore Structures.*

Payer, H. G. and Rathje, H. (2004). Shipboard routing assistance - decision making support for operation of container ships in heavy seas. In *SNAME Annual Meeting.*

Peregrine, D. (1983). Water waves, nonlinear Schrödinger equations and their solutions. *J. Austral. Math. Soc. Ser. B, 25(1)*, pages 16–43.

Perlin, M. and Bustamante, M. D. (2016). A robust quantitative comparison criterion of two signals based on the sobolev norm of their difference. *Journal of Engineering Mathematics*, 101:115–124.

Serio, M., Onorato, M., Osborne, A., and Janssen, P. (2005). On the computation of the benjamin-feir index. *Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C - Geophysics and Space Physics*, 28(6):893–903.

Slunyaev, A., Clauss, G. F., Klein, M., and Onorato, M. (2013). Simulations and experiments of short intense envelope solitons of surface water waves. *Physics of Fluids (1994-present)*, 25(6):–.

Sommerfeld, A. (1949). Partial differential equations in physics. *Academic Press, New York.*

Takezawa, S. and Jingu, N. (1976). Advanced experiment technique for testing ship models in transient water waves. In *11th Symposium on Naval Hydrodynamics.*

van Groesen, E., Andonowati, A., and Karjanto, N. (2006). Displaced phase-amplitude variables for waves on finite background. *Physics Letters A, Vol. 354*, (4):312–319.

WAMIT Inc. (2012). *WAMIT 7.0 User manual.* The Massachusets Institute of Technology. Userguide.

West, B. J., Brueckner, K. A., Janda, R. S., Milder, D. M., and Milton, R. L. (1987). A new numerical method for surface hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 92(C11):11803–11824.

Wolfram, J., Linfoot, B., and Stansell, P. (2000). Long- and short-term extreme Wave Statistics in the North Sea: 1994-1998. In *Rogue Waves 2000*, pages 363–372, Brest, France.

Wu, G. (2004). *Direct simulation and deterministic prediction of large-scale nonlinear ocean wave-field.* PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Ocean Engineering.

Yuen, H. C. and Lake, B. M. (1975). Nonlinear deep water waves: Theory and experiments. *Physics of Fluids, Vol. 18*, pages 956–960.

Yuen, H. C. and Lake, B. M. (1982). Nonlinear dynamics of deep-water gravity waves. *Adv. in Appl. Mech.*, 22:67–229.

Zakharov, V. E. and Shabat, A. B. (1971). Exact theory of two-dimensional self-focussing and one-dimensional self-modulating waves in nonlinear media. *translated in: Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP 34":"62-69), Vol. 2*, pages 118–134.

Nomenklatur

A	Einhüllenden der Wasserspiegelauslenkung	$[m]$
A_0	initiale Amplitude der Einhüllenden	$[m]$
A_S	Amplitude der Soliton-Einhüllenden	$[m]$
E_{f_i,f_j}	Kreuzenergie für die Kreuzkorrelation	
E_{f_i}	Signalenergie für die Kreuzkorrelation	
F_k	Spektrum (Wellenzahl-abhängig)	
$F_{k_j,t_{new}}$	Komplexes Spektrum (Ortsbereich)	
F_w	Fourier-artiges Spektrum (frequenzabhängig)	
H_S	signifikante Wellenhöhe	$[m]$
H_i	Response Amplitude Operator (RAO)	$[\frac{s_i}{m}]$
K_i	Impuls Antwort Funktion (IAF)	$[\frac{s_i}{ms}]$
L	Wellenlänge	$[m]$
L_P	Peak-Wellenlänge	$[m]$
R	Radius der Fluid-Domäne	$[m]$
SSP_W	Surface Similarity der waveTUB-Input-Simulation	
SSP_{HOSM}	Surface Similarity der HOSM-Simulation	
SSP_{NLS}	Surface Similarity der NLS-Simulation	
S_ζ	Seegangsspektrum	$[m^2s]$
S_{s_i}	Bewegungsspektrum	$[m^2s]$
T_P	Peak-Periode	$[s]$
T_{Prog}	Prognosezeitraum	$[s]$

W	Vertikalgeschwindigkeit an der freien Oberfläche	$[\frac{m}{s}]$
Λ	Logarithmisches Dekrement	
Φ	Geschwindigkeitspotential	$[\frac{m^2}{s}]$
Φ_0	Geschwindigkeitspotential Initialwellenfeld	$[\frac{m^2}{s}]$
Φ_7	Geschwindigkeitspotential Diffraktionswellenfeld	$[\frac{m^2}{s}]$
Φ_D	Diffraktion Geschwindigkeitspotential	$[\frac{m^2}{s}]$
$\Phi_{1...6}$	Geschwindigkeitspotential Radiationswellenfeld	$[\frac{m^2}{s}]$
Ψ	Oberflächenpotential	$[\frac{m^2}{s}]$
$\ddot{s}_1...\ddot{s}_3$	Translatorische Körperbeschleunigungen	$[\frac{m}{s^2}]$
$\ddot{s}_4...\ddot{s}_6$	Rotatorische Körperbeschleunigungen	$[\frac{\circ}{s^2}]$
δ	Dämpfungsgrad	
δ^*	Dirac Delta Funktion	
$\dot{s}_1...\dot{s}_3$	Translatorische Körpergeschwindigkeiten	$[\frac{m}{s}]$
$\dot{s}_4...\dot{s}_6$	Rotatorische Körpergeschwindigkeiten	$[\frac{\circ}{s}]$
ϵ	Wellensteilheit	$[-]$
γ	Form- bzw. Vergrößerungsfaktor	$[-]$
ν	Korrekturterm für die Gruppengeschwindigkeit	$[\frac{m}{s}]$
ω_c	Trägerfrequenz	$[m]$
ω_{max}	höchste Spektralfrequenz	$[\frac{rad}{s}]$
ω_{min}	niedrigste Spektralfrequenz	$[\frac{rad}{s}]$
ρ_W	Kreuzkorrelationswert der waveTUB-Input-Simulation	
ρ_{HOSM}	Kreuzkorrelationswert der HOSM-Simulation	
ρ_{NLS}	Kreuzkorrelationswert der NLS-Simulation	
τ	Zeitindex	$[s]$
θ	Phase	$[rad]$
$\triangle$	Laplace Operator	

$\underline{F}_{dyn}$	Vektor der hydrodynamischen Kräfte	
$\underline{F}_{ex}$	Vektor der Erregerkräfte	
$\underline{\ddot{s}}$	Vektor der Körperbeschleunigung	
$\underline{\dot{s}}$	Vektor der Körpergeschwindigkeit	
$\underline{\underline{A}}$	Hydro-Massenmatrix	
$\underline{\underline{B}}$	Matrix der Potentialdämpfung	
$\underline{\underline{B}}_{ext}$	Matrix der externen Dämpfungsparameter	
$\underline{\underline{C}}$	Matrix der Rückstellkräfte	
$\underline{\underline{M}}$	Massenmatrix	
$\underline{s}$	Vektor der Körperbewegung	
$\varphi_1 ... \varphi_3$	Lokales Translationspotential	$[m]$
$\varphi_4 ... \varphi_6$	Lokales Rotationspotential	$[m^2]$
ζ	Wellenamplitude	$[m]$
a_c	Amplitude der Einhüllenden	$[m]$
a_i	i^{th} Ausschwingamplitude	$[m]$
a_{kl}	Hydro-Massenkoeffizienten	
$b_{c,kl}$	Kritische Dämpfung	
b_{kl}	Potentialdämpfungskoeffizienten	
$b_{t,kl}$	Gesamtdämpfung	
$b_{v,kl}$	Viskose Dämpfung	
c_G	Gruppengeschwindigkeit	$[\frac{m}{s}]$
c_{kl}	Rückstellkraftkoeffizienten	
d	Wassertiefe	$[m]$
f	Eingangssignal	
f_T	Eingangsimpuls	
$f_{ex,1} ... f_{ex,3}$	Erregerkräfte	$[\frac{kgm}{s^2}]$
$f_{ex,4} ... f_{ex,6}$	Erregermomente	$[\frac{kgm^2}{s^2}]$

g	Erdbeschleunigung	$[\frac{m}{s^2}]$
h	Impulsantwort	
k	Wellenzahl	$[\frac{1}{m}]$
k_0	Trägerwellenzahl des Spekrtums F_k	$[\frac{1}{m}]$
k_c	Trägerwellenzahl	$[\frac{1}{m}]$
m_{kl}	Starrkörper Massenkoeffizienten	
$s_1 ... s_3$	Translatorische Körperbewegungen	$[m]$
$s_4 ... s_6$	Rotatorische Körperbewegungen	$[°]$
s_T	Rechteckimpuls	
t	Zeit	$[s]$
x, y, z	kartesisches Koordinatensystem	$[m]$
x_{cb}, y_{cb}, z_{cb}	Koordinaten des Auftriebsschwerpunktes	$[m]$
x_{cg}, y_{cg}, z_{cg}	Schwerpunktkoordinaten	$[m]$
x_{shift}	örtlicher Versatz (TWP)	

Abkürzungsverzeichnis

BMWi	**B**undes**m**inisterium für **Wi**rtschaft und Energie
BSH	**B**undesamts für **S**eeschifffahrt und **H**ydrographie
CFD	**C**omputational **F**luid **D**ynamics
F2T+	Improved **F**requency to **T**ime Domain (erweiterte Impulsantwortfunktion)
FINO	**F**orschungsplattformen **I**n **N**ord- und **O**stsee
HOSM	**H**igher **O**rder **S**pectral **M**ethod
IR	**I**nfra **R**ot/**I**nfra **R**ed
IAF/IRF	**I**mpuls **A**ntwort **F**unktion/**I**mpulse **R**esponse **F**unction
LED	**L**icht-**E**mittierende **D**iode
NLS	**N**icht**l**ineare **S**chrödinger (Gleichung)
ONLS	**NLS**-Gleichung im **O**rtsbereich
OWS	**O**cean**W**ave**S**
PrOWOO	**Pr**ognose **O**ptimaler **W**etterfenster für **O**ffshore **O**perationen
RAO	**R**esponse **A**mplitude **O**perator
SSP	**S**urface **S**imilarity **P**arameter
TNLS	**NLS**-Gleichung im Zeitbereich
TUB	**T**echnische **U**niversität **B**erlin
VWS	**V**ersuchsanstalt für **W**asserbau und **S**chiffbau
WAMIT	**W**ave **A**nalysis at **M**assachusetts **I**nstitute of **T**echnology
WaMoS	**Wa**ve and Surface Current **Mo**nitoring **S**ystem

waveTUB **Wave** Analysis at **T**echnische **U**niversität **B**erlin

WT **W**ellen**T**heorie

Anhang A

Viskose Dämpfung

Für die numerischen Analysen wurde das auf Potentialtheorie basierende Programm WAMIT (vgl. Kap. 4.1.1) um experimentell ermittelte viskose Koeffizienten erweitert (vgl. Kap. 4.1.2). Nachfolgend sind die Ergebnisse der Versuchsreihen sowie die darauf basierende Bestimmung der viskosen Anteile für den Halbtaucher (Abb. A.1 - A.3) und die Barge (Abb. A.4 - A.6) aufgelistet. Dabei wurden neben den am stärksten von Viskosität beeinflussten Freiheitsgraden – Rollen und Stampfen – auch die Tauchbewegung analysiert, da sich vor allem beim Halbtaucher die Übertragungsfunktion hier signifikant verändert (vgl. Abb. 4.8, Halbtaucher RAO Tauchen, $\beta = 180°$).

Generell wurden jeweils drei Versuchsreihen für die Bestimmung der Koeffizienten der jeweiligen Freiheitsgrade verwendet. Auf Grund des stark gedämpften Bewegungsverhaltens der Barge können hier nur wenige Schwingungsdurchläufe ausgewertet werden. Daher wurden hier zusätzlich numerische Dämpfungsversuche mit CFD-Methoden durchgeführt, welche die experimentellen Analysen erweitern und in die Auswertung mit einfließen.

Tabelle A.1: Auswertung der Dämpfungsversuche des Kranhalbtauchers – Tauchbewegung (*heave*).

	heave 1		**heave 2**		**heave 3**	
#	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}
0	**0,046493**	**-0,038084**	**0,014567**	**-0,013710**	**0,011286**	**-0,010599**
1	0,032410	-0,029522	0,010019	-0,008046	0,008175	-0,008947
2	0,026811	-0,025092	0,008844	-0,008627	0,006616	-0,008042
3	0,022358	-0,021864	0,008652	-0,006978	0,007018	-0,006167
4	0,020136	-0,019776	0,005771	-0,004663	0,005896	-0,004734
5	0,019998	-0,018836	0,007001	-0,006624	0,006884	-0,005065
6	0,019094	-0,017511	0,007275	-0,005964	0,006019	-0,004921
7	0,015747	-0,016624	0,006075	-0,005323	0,005464	-0,006064
8	0,015462	-0,013657	0,006095	-0,006728	0,006997	-0,005942
9	0,012793	-0,011907	0,007023	-0,004547	0,004679	-0,004776
10	0,012590	-0,010373	0,004808	-0,002344	0,004373	-0,004431
11	0,009325	-0,008623	0,003328	-0,003540	0,005847	-0,003890
12	0,009080	-0,008367	0,004231	-0,003535	0,003680	-0,002083
13	0,010153	-0,009009	0,002012	-0,001463	0,002984	-0,002647
14	0,009317	-0,007944	0,002375	-0,004115	0,005105	-0,002764
15	0,007959	-0,008542	0,004022	-0,003681	0,003745	-0,001678
16	0,008007	-0,008278	0,002771	-0,002883	0,003048	-0,003481
17	0,007757	-0,006397	0,003900	-0,004283	0,004674	-0,003528
18	**0,006505**	**-0,005187**	0,002990	-0,002530	0,003105	-0,001952
19	0,009011	-0,005166	0,002382	-0,001634	0,001690	-0,002655
20	0,007048	-0,002347	0,002462	-0,001614	0,003937	-0,002587
21			0,002378	-0,001621	**0,001556**	**-0,001280**
22			0,001880	-0,001094		
23			**0,002260**	**-0,001962**		
s_0/s_n	7,147417	7,342546	6,444306	6,988179	7,252829	8,277866
$\ln(\dots)$	1,966751	1,993686	1,863197	1,944220	1,981392	2,113585
Λ	0,109264	0,110760	0,081009	0,084531	0,094352	0,100647
δ	0,017387	0,017625	0,012892	0,013452	0,015015	0,016016
B_{total}	4,83E+06	4,89E+06	3,58E+06	3,73E+06	4,17E+06	4,45E+06
B_{total}	**4,27E+06**	$B_{Potential}$	**4,08E+06**	B_{Viskos}	**1,89E+05**	**4,4%**

Tabelle A.2: Auswertung der Dämpfungsversuche des Kranhalbtauchers – Rollbewegung (*roll*).

	roll 1		**roll 2**		**roll 3**	
#	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}
0	**7,878519**	**-6,666594**	**7,772183**	**-6,542881**	**8,849418**	**-7,334029**
1	5,692119	-5,111787	5,552232	-5,083819	6,276901	-5,535801
2	4,640764	-4,282885	4,555889	-4,358521	5,135032	-4,596959
3	3,975774	-3,690204	3,958993	-3,688977	4,213931	-3,950690
4	3,551646	-3,255511	3,495655	-3,260438	3,619974	-3,355775
5	3,142901	-2,924345	2,984608	-2,984361	3,077638	-2,975071
6	2,827482	-2,648961	2,657404	-2,676231	2,918400	-2,716589
7	2,496174	-2,404141	2,475962	-2,408923	2,568904	-2,467346
8	2,278618	-2,152728	2,227154	-2,207017	2,380860	-2,221627
9	2,115794	-1,949059	2,147885	-1,911840	2,128969	-2,049943
10	1,857414	-1,734927	1,878255	-1,850756	1,905268	-1,849583
11	1,825872	-1,665091	1,800948	-1,657446	1,774854	-1,818686
12	1,689483	-1,614587	1,575338	-1,690368	1,638862	-1,628600
13	1,581105	-1,379553	1,509307	-1,470470	1,502587	-1,490106
14	1,453176	-1,347557	1,477577	-1,326617	1,454395	-1,349988
15	1,296706	-1,214353	1,404494	-1,260937	1,394316	-1,189936
16	1,280791	-1,133228	1,223708	-1,163532	1,290662	-1,088690
17	1,113099	-1,068585	1,155630	-1,119067	1,163579	-1,060331
18	1,166874	-1,040932	1,067002	-1,005979	1,062169	-0,979018
19	1,144258	-0,888861	0,956283	-0,994040	1,026666	-0,893249
20	0,855801	-0,771837	0,905227	-0,943797	**1,021700**	**-0,893519**
21	0,908904	-0,693152	0,829274	-0,798507		
22	0,844431	-0,790471	0,786412	-0,775299		
23	0,749668	-0,719810	0,851583	-0,755922		
24	0,824359	-0,690735	0,765703	-0,668869		
25	0,630026	-0,488826	0,611230	-0,654471		
26	0,738338	-0,681049	0,609134	-0,633152		
27	0,602903	-0,528391	0,533000	-0,536821		
28	0,557667	-0,500792	0,486508	-0,469871		
29	**0,567653**	**-0,516552**	0,531022	-0,523725		
30	0,473115		0,471078	-0,570570		
31			0,474347	-0,470367		
32			0,478964	-0,462287		
33			0,387515	-0,346963		
34			0,347715	-0,332732		
35			0,401954	-0,309631		
36			**0,335430**	**-0,262395**		
s_0/s_n	13,87911	12,90596	23,17081	24,93522	8,661467	8,208025
$\ln(\dots)$	2,630385	2,557689	3,142893	3,216281	2,158884	2,105112
Λ	0,090703	0,088196	0,087303	0,089341	0,107944	0,105256
δ	0,014434	0,014035	0,013893	0,014218	0,017177	0,016750
B_{total}	2,60E+09	2,53E+09	2,50E+09	2,56E+09	3,09E+09	3,02E+09
B_{total}	**2,72E+09**	$B_{Potential}$	**6,61E+07**	B_{Viskos}	**2,65E+09**	**97,6%**

Tabelle A.3: Auswertung der Dämpfungsversuche des Kranhalbtauchers – Stampfbewegung (*pitch*).

	pitch 1		**pitch 2**		**pitch 3**	
#	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}
0	**4,428904**	**-4,080991**	**4,899929**	**-4,252425**	**4,618411**	**-4,049766**
1	3,652305	-3,395021	3,893490	-3,451559	3,768139	-3,398277
2	3,066001	-2,883724	3,192730	-2,837495	3,179394	-2,869586
3	2,602544	-2,446945	2,695917	-2,418186	2,747128	-2,469716
4	2,244325	-2,116712	2,325575	-2,082853	2,314936	-2,109148
5	1,909864	-1,850437	2,036362	-1,815425	2,040775	-1,815475
6	1,690397	-1,657807	1,799421	-1,632861	1,768486	-1,587440
7	1,517061	-1,519878	1,608299	-1,451757	1,578902	-1,438206
8	1,387726	-1,373165	1,459299	-1,332246	1,475751	-1,327848
9	1,262409	-1,267969	1,358698	-1,212155	1,364566	-1,185363
10	1,155917	-1,159585	1,259107	-1,097013	1,239911	-1,067348
11	1,058628	-1,038394	1,148920	-0,994401	1,114279	-0,973552
12	0,940727	-0,939168	1,028729	-0,904652	0,980782	-0,851776
13	0,839997	-0,856489	0,921969	-0,823677	0,874469	-0,755748
14	0,768332	-0,804151	0,848745	-0,735901	0,814079	-0,706980
15	0,718671	-0,745933	0,778245	-0,655320	0,751844	-0,662214
16	0,666329	-0,687485	0,705120	-0,583213	0,723749	-0,608806
17	0,609772	-0,627061	0,649259	-0,522248	0,699461	-0,597704
18	0,576616	-0,589363	0,583957	-0,454314	0,654521	-0,540600
19	0,517656	-0,539402	0,519810	-0,381071	0,633243	-0,498060
20	0,459807	-0,469964	**0,448256**	**-0,328695**	0,573622	-0,447974
21	0,421462	-0,435028			0,541041	-0,420576
22	0,385794	-0,399840			0,527049	-0,415273
23	0,359928	-0,360405			**0,496070**	**-0,366333**
24	0,314009	-0,301045				
25	0,247538	-0,245262				
26	**0,182482**	**-0,196424**				
s_0/s_n	24,27042	20,77644	10,93109	12,93729	9,309996	11,05487
$\ln(\dots)$	3,189258	3,033820	2,391611	2,560114	2,231089	2,402871
Λ	0,122664	0,116685	0,119581	0,128006	0,097004	0,104473
δ	0,019519	0,018568	0,019028	0,020369	0,015437	0,016625
B_{total}	1,07E+10	1,02E+10	1,04E+10	1,12E+10	8,47E+09	9,12E+09
B_{total}	**1,00E+10**	$B_{Potential}$	**4,96E+09**	B_{Viskos}	**5,05E+09**	**50,4%**

Tabelle A.4: Auswertung der Dämpfungsversuche der Barge – Tauchbewegung (*heave*).

	Modellversuche				**CFD-Methoden**	
	heave 1		**heave 2**		**heave 3**	
#	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}
0	0,004302	-0,000879	0,005430	-0,000991	0,008158	-0,015000
1	0,000750	-0,000868	0,000201	-0,000753	0,000809	-0,001449
2		-0,000590				
s_0/s_n	5,738536	1,489837	26,98836	1,316642	10,08252	10,35102
$\ln(\dots)$	1,747204	0,398667	3,295406	0,275085	2,310803	2,337086
Λ	1,747204	0,199333	3,295406	0,275085	2,310803	2,337086
δ	0,267911	0,031709	0,464473	0,043739	0,345172	0,348623
B_{total}	1,10E+08	1,31E+07	1,91E+08	1,80E+07	1,42E+08	1,44E+08
B_{total}	**1,03E+08**	$B_{Potential}$	**1,01E+08**	B_{Viskos}	**2,38E+06**	**2,3%**

Tabelle A.5: Auswertung der Dämpfungsversuche der Barge – Rollbewegung (*roll*).

	Modellversuche				**CFD-Methoden**	
	roll 1		**roll 2**		**roll 3**	
#	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}
0	1,750828	-2,751107	1,889864	-1,156186	0,987982	-1,598500
1	0,563608	-0,963886	0,648665	-0,430108	0,310956	-0,549438
2	0,158057	-0,283999	0,251870	-0,063389	0,110209	-0,182148
3	0,078594	-0,097705				-0,069156
4	0,022515	-0,037965				
s_0/s_n	77,76414	72,46392	7,503343	18,23950	8,964660	23,11456
$\ln(\dots)$	4,353680	4,283089	2,015349	2,903589	2,193290	3,140463
Λ	1,088420	1,070772	1,007674	1,451795	1,096645	1,046821
δ	0,170685	0,167997	0,158353	0,225129	0,171937	0,164341
B_{total}	2,06E+10	2,02E+10	1,91E+10	2,71E+10	2,07E+10	1,98E+10
B_{total}	**2,12E+10**	$B_{Potential}$	**1,63E+10**	B_{Viskos}	**4,92E+09**	**23,1%**

Tabelle A.6: Auswertung der Dämpfungsversuche der Barge – Stampfbewegung (*pitch*).

	Modellversuche				**CFD-Methoden**	
	pitch 1		**pitch 2**		**pitch 3**	
#	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}	s_{max}	s_{min}
0	0,719144	-0,372482	0,638463	-0,272866	0,317051	-0,670831
1	0,200622	-0,106782	0,120410	-0,037051	0,044714	-0,116389
2	0,067773	-0,057909	0,049115	-0,002028	0,008382	-0,010297
3	0,035556	-0,034478	0,048578			-0,000941
s_0/s_n	20,22546	10,80340	13,14315	134,5812	37,82491	712,8232
$\ln(\dots)$	3,006942	2,379861	2,575901	4,902168	3,632968	6,569233
Λ	1,002314	0,793287	0,858634	2,451084	1,816484	2,189744
δ	0,157531	0,125261	0,135397	0,363428	0,277729	0,329096
B_{total}	1,17E+11	9,26E+10	1,00E+11	2,69E+11	2,05E+11	2,43E+11
B_{total}	**1,71E+11**	$B_{Potential}$	**1,34E+11**	B_{Viskos}	**3,75E+10**	**21,9%**