

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Online First

**Lieske, Mike; Schlurmann, Torsten; Kerpen, Nils B.**  
**Seegangsbelastungen (SEELE) – Prozesse der Hydrodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung**

Die Küste 89 (Online First)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**KFKI - Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hg.)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107498>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lieske, Mike; Schlurmann, Torsten; Kerpen, Nils B. (2021): Seegangsbelastungen (SEELE) – Prozesse der Hydrodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung. In: Die Küste 89 (Online First). <https://doi.org/10.18171/1.089102>.

**Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Seegangsbelastungen (SEELE) – Prozesse der Hydrodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung

Mike Lieske<sup>1</sup>, Torsten Schlurmann<sup>2</sup> und Nils B. Kerpen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Leibniz Universität Hannover, Ludwig-Franziskus-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, [lieske@lufi.uni-hannover.de](mailto:lieske@lufi.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Leibniz Universität Hannover, Ludwig-Franziskus-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen

## Zusammenfassung

Die Errichtung von Bauwerken im küstennahen und Offshore-Bereich erfährt seit einigen Jahren, insbesondere im Hinblick auf die Erschließung neuer, regenerativer Energiequellen, eine zunehmend größere Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens Seegangsbelastungen (SEELE) (FKZ 03KIS107) Untersuchungen zum Einfluss der Interaktion zwischen Seegangs- bzw. Wellenbelastungen und (Tide-) Strömung auf Bauwerke im Küstennahbereich durchgeführt, mit dem Ziel der Erweiterung des wissenschaftlichen und technischen Prozessverständnisses zur schrägen Wellen-Strömungs-Interaktion. Die Basis stellten wissenschaftliche Untersuchungen von physikalischen Modellversuchen im 2013/2014 erweiterten 3D-Wellenbecken des Ludwig-Franziskus-Instituts für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen in Hannover dar. Der Schwerpunkt der Forschung lag auf der Untersuchung von langkämmigen Wellen, die sich schräg, gleich- oder entgegengesetzt zur Strömungsrichtung ausbreiten. Dabei wurde die Interaktion mit einem Strömungsfeld für unterschiedliche Wassertiefen, Wellenperioden, Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten in einem 3D-Wellen-Strömungsbecken untersucht. Das Ziel des Projekts war eine tiefere Einsicht in die Prozesse der Wellen-Strömungs-Interaktion und deren Dokumentation.

## Schlagwörter

Strömung, Wellen, schräge Wellen-Strömungs-Interaktion, 3D-Wellenbecken, wasserbau-liche Modellversuche

## Summary

*Natural processes drive the nonlinear interactions between waves and currents. The robust reproduction of systems and states in natural environments is still rather limited and therefore physical model tests of wave-current conditions are required. Usually, assessments of processes and loads on coastal structures are derived from experiments either regarding flow only or waves only scenarios in independent physical models and therefore exclude the interaction between waves and currents as a regular feature. Assessments of loads on coastal structures stemming from oblique wave-current interaction remain a challenging and underresearched topic. For this reason, the KFKI research project “Seegangsbelastungen (Seele)” (Contract No. 03KIS107)*

*was founded by the German “Federal Ministry of Education and Research (BMBF)”. Experiments in a 3D wave-current basin were performed to thoroughly investigate drivers and effects of oblique wave-current interaction. Experiments comprise long-crested regular and irregular wave trains on obliquely opposing and following currents for different wave periods, wave heights and flow rates. To observe the physical processes of wave-current interaction, it was essential to proceed as follows:*

- 1. Detailed flow experiments without waves (current alone, CA) in order to characterise the undisturbed currents.*
- 2. Detailed wave experiments without current (waves alone, WA) in order to characterise the undisturbed waves.*
- 3. Wave-current (WC) experiments in order to determine the deviations from only-current and only-wave conditions in order to identify the wave-current interactions.*

*Following this approach, an accurate evaluation of the processes of wave-current interaction was carried out and includes the investigation of side effects of the testing facility.*

## **Keywords**

*current, waves, oblique wave-current interaction, 3D wave basin, physical model tests*

## **1 Einleitung**

Die Errichtung von Bauwerken im küstennahen Bereich erfährt seit einigen Jahren, insbesondere im Hinblick auf die Erschließung neuer, regenerativer Energiequellen, eine immer größere Bedeutung. In diesem Zusammenhang spielen neben der Offshore-Windenergie zusätzlich andere Energienutzungsformen, wie z. B. Tidenströmungs- oder Wellenenergiekraftwerke, eine zentrale Rolle.

Gründungsstrukturen und Verankerungen stellen häufig einen erheblichen Teil der gesamten Investitionskosten meeres technischer Konstruktionen dar. Dennoch ist deren Bemessung derzeit häufig mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, welche vorwiegend auf Lücken hinsichtlich des Verständnisses und der Modellbildung dynamischer Prozesse und Versagensmechanismen bei der Wechselwirkung zwischen Seegang, Bauwerk und Boden zurückzuführen sind. Die Vorhersage von Lastzuständen an Bauwerken ist für eine wirtschaftliche Dimensionierung jedoch von großer Bedeutung. Durch den Betrieb verschiedenster meeres technischer Konstruktionen steigt seit Jahren das Interesse am generellen und detaillierten Prozessverständnis sowie den resultierenden Belastungen während der Interaktion von natürlichem Seegang mit Strömungen. Küstenschutzbauwerke werden zudem meist vom natürlichen Seegang mit überlagerter Küstenquerströmung belastet. Es existierten bislang nur wenige Forschungseinrichtungen, die diese Phänomene „dreidimensional“, d. h. mit Möglichkeiten zur räumlichen und wirklichkeitsnahen Überlagerung und Analyse der Interaktion von Strömungen mit Richtungsseegang im physikalischen Modell analysieren konnten.

Zur Dimensionierung von Schutz- und Gründungsbauwerken sind u. a. hydraulische Randbedingungen erforderlich. Je genauer diese im Vorfeld abgeschätzt bzw. prognostiziert werden können, desto ökonomischer können die Dimensionierung der Bauwerke und ggf. auch deren Unterhaltung über den Lebenszyklus ausfallen. Große Unsicherheiten bestehen derzeit vor allem in der Quantifizierung des Einflusses von Strömungen auf den

vorherrschenden Seegang, das Brechen von Wellen und die Kolkausbildung bauwerksnah. Daher stellt die Beschreibung und das Verständnis der physikalischen Prozesse bei der Änderung von Seegangsparemtern durch die Präsenz und bedingten Wechselwirkungen einer Strömung mit Wellen einen Schwerpunkt des Forschungsprojekts dar.

Mit zunehmender Rechnerleistung sind in den vergangenen Jahren auch die Möglichkeiten zur Untersuchung o. g. Fragestellungen mittels numerischer Berechnungsmethoden gestiegen. Numerische Berechnungen für Seegangsszenarien liefern makroskopisch betrachtet gute Näherungen. Auf Meso- und Mikro-Ebene, d. h. vor allem zeitlich und örtlich hochaufgelöst, bedarf es allerdings nach wie vor belastbarer Validierungsdaten der Modelle, welche aus Messungen in physikalischen Modellversuchen gewonnen werden können.

Für die genannten Fragestellungen und Untersuchungsschwerpunkte war die Erweiterung der vorhandenen Versuchseinrichtung im bestehenden 3D-Wellenbecken des Ludwig-Franzius-Instituts um die Generierung von Strömungen sowie weiterer technischer Anlagen erforderlich. Das 3D-Wellen-Strömungsbecken mit einem modularen Tieftteil im Zentrum des Beckens bietet somit auch nach Beendigung des Forschungsvorhabens zahlreiche neue Möglichkeiten der Analyse und Bewertung von Belastungen auf Gründungsbauwerke aufgrund kombinierter Einflüsse aus Richtungsseegang und Strömung sowie sich einstellende Erosions- und Sedimentationsprozesse am Meeresboden.

Die zur Erreichung der Ziele des Forschungsvorhabens erforderlichen Arbeiten lassen sich hierbei wie nachfolgend aufgeführt zusammenfassen:

- Vorarbeiten, Konzeption und Installation der Erweiterungsmaßnahmen zur Strömungsgenerierung, Kolkbildungsuntersuchung und Wellenabsorption im bestehenden 3D-Wellenbecken.
- Messungen und Analysen zur Veränderung der Seegangscharakteristik bei einer schrägen oder orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion.
- Formulierung allgemeingültiger Zusammenhänge o. g. Untersuchungen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten KFKI-Forschungsvorhabens wurden zwei Treffen mit einer projektbegleitenden Gruppe zum wissenschaftlichen Ergebnisaustausch durchgeführt. Die projektbegleitende Gruppe setzte sich aus Expertinnen und Experten unterschiedlicher Einrichtungen mit breitem Hintergrundwissen zusammen. Folgende Teilnehmer/Organisationen waren vertreten:

- Dipl.-Ing. Holger Blum, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Direktion Norden
- Prof. Dr. Gabriele Gönnert, Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG Hamburg), Hamburg
- Dipl.-Ing. Holger Rahlf, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg
- Dipl.-Ing. Frank Thorenz, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Direktion Norden; Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)
- Dr. Manfred Zeiler, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Hamburg

## 2 Stand der Wissenschaft

Die theoretischen Grundlagen zur wissenschaftlichen Analyse der Prozesse aus Hydro-, Sediment- und Morphodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung sind detailliert in Lieske et al. (2017) veröffentlicht und adressieren folgende Schwerpunkte:

- (i) Klassifizierung von Strömungen, turbulenten Strömungseigenschaften, Art der Turbulenz sowie Analysemöglichkeiten turbulenter Strömungen
- (ii) Wellen im Kontext von Wellentheorien, Wellentransformationen, der Parametrisierung von Seegang, Analysemethoden in Zeit- und Frequenzbereich sowie Analysemethoden von multidirektionalem Seegang
- (iii) Wellen-Strömungs-Interaktion mit dem gesonderten Fokus des Einflusses von Strömungen auf Wellen und analog dem Einfluss von Wellen auf Strömungen.

Im Nachfolgenden wird eine kurze Übersicht zum Stand der Wissenschaft zur Interaktion von Wellen mit Strömungen gegeben und veröffentlichte Ergebnisse zu Erkenntnissen aus physikalischen Modellversuchen zusammengefasst.

### 2.1 Interaktion von Wellen und Strömungen

Die Interaktion von Wellen und Strömungen ist in der Theorie bereits beschrieben. Im nachfolgenden wird einleitend eine kurze Zusammenfassung der gesammelten Erkenntnisse aus Peregrine (1976) und Peregrine und Jonsson (1983) gegeben.

Wasserwellen breiten sich als Störung an der Wasseroberfläche aus, der Wellenfortschritt ist direkt von der Wassertiefe abhängig. Während sich die Wellenorbitale im Tiefwasser nahezu unbeeinflusst bewegen können, kommt es im Übergangsbereich und vor allem im Flachwasserbereich zu einem Kontakt der Wellen mit der Sohle, was zu einer Stauchung der Wellenorbitale führt. Im Falle einer in der Wassersäule auftretenden Strömung, die sich im Einflussbereich der Wellenorbitale bewegt, kann es zu einer Beeinflussung der Oberflächenwelle durch die Strömung kommen.

Windwellen in der Natur werden durch Wind erzeugt. Strömungen können den effektiven Wind beeinflussen, da sich die relative Geschwindigkeit des Windes zu einer bewegten Wasseroberfläche zur relativen Geschwindigkeit des Windes zu einem festen Boden unterscheidet. Frei laufende Wellen werden sowohl durch die Grundberührung als auch durch Interaktion mit Strömungen refraktiert, wobei sich dieser Effekt in Küstennähe aufgrund der größeren Strömungsgradienten stärker ausprägen kann als auf offener See.

Zwei wesentliche Einflüsse von Strömungen wirken auf windgenerierte Wellen. Einerseits wird die relative Geschwindigkeit zwischen Luft und Wasser entweder erhöht oder gesenkt (größerer Einfluss bei entgegengesetzter Strömung) und andererseits die Änderung der effektiven Streichlänge (-dauer) des Windes. Bei entgegengesetzter Strömung erhöht sich die effektive Streichlänge und bei Strömungen in gleicher Richtung verringert sie sich entsprechend.

Die meisten theoretischen Arbeiten über Wellen-Strömungs-Interaktion basieren auf einer idealisierten, gleichförmigen Strömung. Strömungen, die für die Wellen-Strömungs-Interaktion von Bedeutung sind, beinhalten Tidenströmungen, Meeresströmungen, lokale Strömungen (windgeneriert), Flusströmungen und wellengenerierte Strömungen. Die regelmäßigsten und berechenbarsten dieser Strömungen sind die Tidenströmungen, welche

gleichzeitig in den meisten Fällen auch die maßgeblichen Strömungen darstellen. Sie beeinflussen die sich oberhalb der Strömung ausbreitenden Wellen am dominantesten.

Um das Berechnen der Veränderung von Wellenlängen (Wellenlänge  $L_1 \rightarrow$  Wellenlänge  $L_2$ ) und Wellenhöhen (Wellenhöhe  $H_1 \rightarrow$  Wellenhöhe  $H_2$ ) eines Wellenzuges durch die Interaktion mit einer großmaßstäblichen Scherströmung über einer horizontalen Sohle zu ermöglichen (vgl. Abbildung 1), wurde von Jonsson und Skovgaard (1978) die sogenannte Erhaltung der „wave action“ eingeführt. Diese neue Größe wird beschrieben als Energieeinheit pro Wellenkammlänge, dividiert durch die Kreisfrequenz der Welle. Eine Scherströmung repräsentiert eine horizontal in gleiche Richtung verlaufende Strömung, die zwei unterschiedliche vertikale Strömungsgeschwindigkeiten aufweist. Diese beiden Geschwindigkeiten sind, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, durch einen Übergangsbereich, die sogenannte vertikale Scherschicht, voneinander getrennt. Dieser Umstand kann nach Jonsson und Skovgaard (1978) zum Beispiel auf eine Tidenströmung zutreffen. Die einlaufenden Wellen werden an der Scherschicht, die theoretisch mehrere Wellenlängen breit sein kann, aufgrund des Geschwindigkeitsgradienten refraktiert. In Wellen-Strömungs-Systemen, wie sie oben beschrieben werden, wird zwischen drei Kurven unterschieden:

- Stromlinien,
- Wellenorthogonalen und
- Wellenstrahlen (wave rays)

Eine Stromlinie gibt die mittlere lokale Fließrichtung der Strömung an. Die Wellenorthogonale ist definiert als die Senkrechte zum Wellenkamm und der Wellenstrahl als eine parallele Linie zum lokalen Gruppengeschwindigkeitsvektor. Ohne Strömungseinfluss ergibt der Wellenstrahl eine Parallele zur Wellenfront, jedoch weicht sie, im Gegensatz zur Wellenorthogonalen, unter Einfluss einer schräg wirkenden Strömung davon ab (Herchenroder 1981), so wie in Abbildung 2 dargestellt.

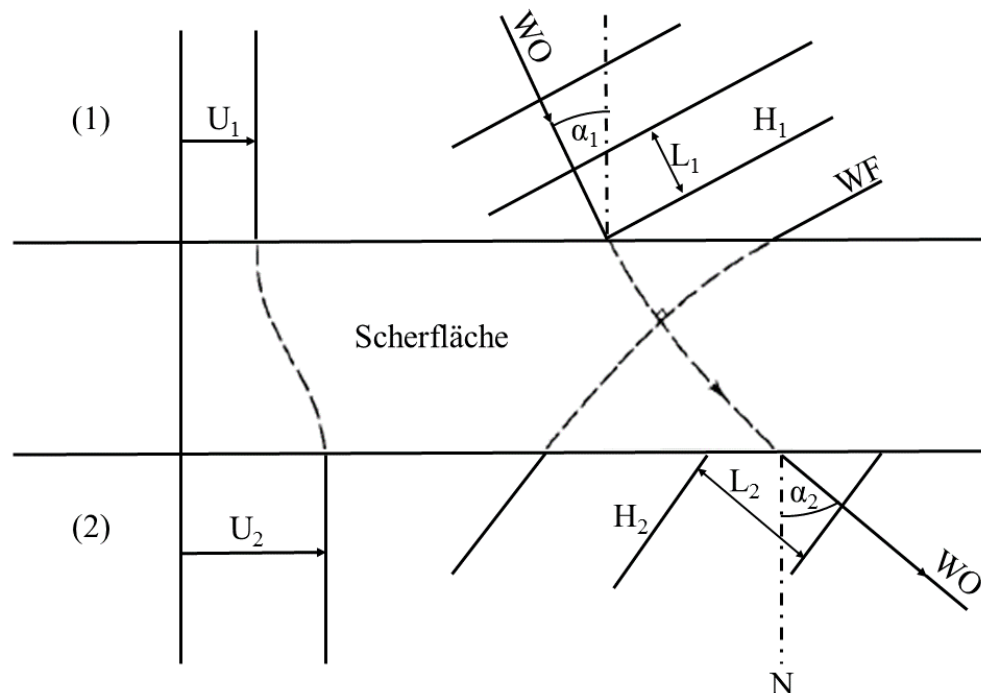


Abbildung 1: Fortschreiten einer Welle auf einer Scherströmung vom Geschwindigkeitsbereich eins ( $U_1$ ) in den Geschwindigkeitsbereich zwei ( $U_2$ ). Mittlere Wellenfront ( $WF$ ) und Wellenorthogonale ( $WO$ ) in horizontaler Draufsicht (nach Jonsson und Skovgaard 1978).

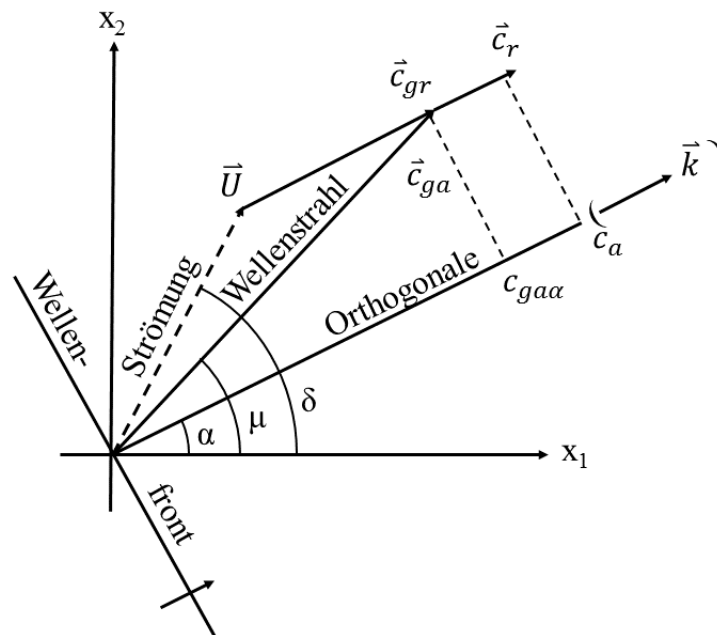


Abbildung 1: Horizontale Darstellung der Wellenstrahlen, der absoluten Gruppengeschwindigkeit  $c_{gr}$ , der absoluten Phasengeschwindigkeit  $c_a$  sowie des Wellenzahlvektors  $k$  (nach Jonsson 1990).

Große gleich- und entgegen-gerichtete Strömungen sind gemäß Jonsson und Skovgaard (1978) in der Lage, die Wellensteilheit signifikant zu erhöhen. Scherströmungen können einen sogenannten Filterungseffekt bezüglich der Wellen auslösen. Dabei steilen sich kurze Wellen, auf Grund ihrer geringeren Geschwindigkeit, im Bereich der Scherfläche soweit auf, dass sie brechen, bevor sie die Fläche vollständig passieren.

Die Veränderung einer Welle durch eine horizontale Strömung kann auf mehrere Wege erfolgen. Zum einen kann die Wellenlänge dahingehend modifiziert werden, dass Wellenzüge lokal gestreckt oder gestaucht werden und sich aus dieser Verzerrung eine Dopperverschiebung ergibt. Dies resultiert darin, dass aus einer stationären Beobachtung eine andere Periode ermittelt wird, als aus einer Beobachtung, die sich mit der lokalen Strömungsgeschwindigkeit bewegt. Zum anderen verändern sich die Richtungen der Wellenorthogonale, der Wellenkämme und der Wellenstrahlen (Herchenroder 1981).

Die Dopplerverschiebung ergibt sich aus der Änderung in der beobachteten Frequenz einer Welle, die durch die relative Bewegung zwischen Quelle und Empfänger entsteht. Dadurch wird eine andere Frequenz wahrgenommen, als die tatsächlich von der Welle erzeugte Frequenz. Die Frequenz erhöht sich demnach, wenn der Empfänger sich zur Quelle hin bewegt und mündet in einer Verringerung der Frequenz bei einer Entfernung von der Quelle (Baldenhofer und Marschall 2015).

Eine klare Trennung bzw. Identifizierung der Geschwindigkeitskomponenten von Wellen und Strömung ist laut Peregrine und Jonsson (1983) unbedingt anzustreben. Nur so ist eine eindeutige Festlegung der relevanten Rahmenbedingungen für die Wellen-Strömungs-Interaktion möglich. Das Ziel ist die Definition zweier unterschiedlicher Bezugsrahmen. Der erste Bezugsrahmen ist stationär und soll die Wellenbewegungen erfassen. Der zweite Bezugsrahmen soll sich mit der Strömung bewegen und deren Parameter abbilden. Diesbezüglich bestehen allerdings Unsicherheiten, da der zweite Rahmen nur für eine perfekt gleichförmige Strömung einfach zu definieren ist, weshalb es bei einer ungleichförmigen Strömung zu einer Fehlinterpretation der praktischen oder analytischen Ergebnisse kommen kann.

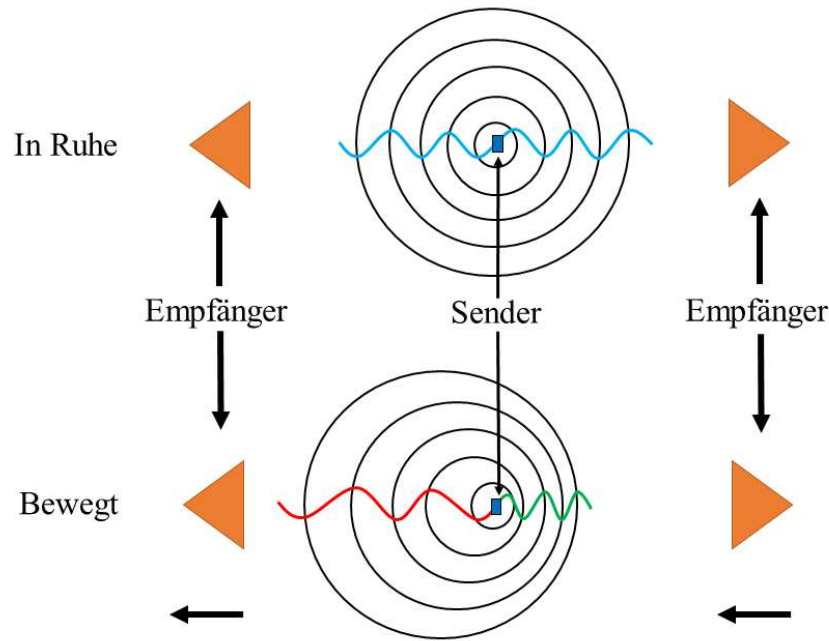


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Dopplerverschiebung. Oben befinden sich Sender (Mitte) und Empfänger (links und rechts) in Ruhe, beide aufgenommenen Frequenzen sind identisch. Unten bewegen sich beide Empfänger relativ zum Sender, links vom Sender weg und rechts auf den Sender zu. Links wird die Frequenz, aufgrund der Bewegung, scheinbar kleiner und rechts größer (nach Kronawitter 2002).

Die meisten Ergebnisse bezüglich des Refraktionseffekts, die in Peregrine und Jonsson (1983) Erwähnung finden, basieren auf linearen Wellentheorien, welche jedoch in Einzelfällen auf nichtlineare Fälle angewendet werden können, wie im Fall der Dopplerrelation. Viele weitere lineare Lösungen müssen modifiziert werden. Bezogen auf herkömmliche Wellenrefraktion bestehen bei auftretender Refraktion unter Strömungseinfluss zwei wesentliche Unterschiede:

- Die Strömung transportiert das Wasser, weshalb Energie zusammen mit der Welle in die gleiche Richtung transportiert werden kann, was sonst nicht der Fall ist.
- Wellenenergie wird, aufgrund des Energieaustauschs mit der Strömung, auch ohne den Einfluss von Reibungsverlusten dissipiert.

Bezüglich der Refraktionstheorie besteht die vordergründige Annahme von lokalen, flachen Wellen, wodurch sich Wellen jederzeit durch flache Wellenzüge auf einer lokalen Ebene erkennen lassen (Peregrine und Jonsson 1983).

Eine Strömung ist durch Turbulenz gekennzeichnet und wird mithilfe einer mittleren Strömung annähernd beschrieben. Durch die vorhandene Turbulenz der Strömung besteht eine Interaktion mit der Wasserwelle. Aufgrund von Turbulenzen in einer Strömung lässt sich die mittlere Fließgeschwindigkeit  $U$  nicht mit Hilfe von einfachen mathematischen Formeln beschreiben (Peregrine 1976).

Der größte Unterschied in der Wellenausbreitung im Vergleich zum Fall ohne Strömung (nur Wellen) ist die Tatsache, dass die Richtung der Wellenstrahlen vom Wellenzahlvektor abweichen kann. Der Wellenstrahl ist üblicherweise nicht normal zur Wellenkante, es sei denn Wellen und Strömung hätten die gleiche Fortschrittsrichtung. Daraus folgt, dass die Wellenorthogonalen der Wellenkämme nicht unbedingt die Fortschrittsrichtung anzeigen (Peregrine und Jonsson 1983).



Thomas (1990) vergleicht Modellergebnisse mit Daten aus Experimenten. Er stellt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Wellenlängen und Geschwindigkeitsprofilen fest. Basierend auf diesen Vergleichen können Rückschlüsse auf den Einfluss der Turbulenzverteilung auf die Fließkinematik und die Anwendbarkeit von verschiedenen Wellentheorien gezogen werden. Die gewonnenen Ergebnisse werden in einem größeren Rahmen, unter Anwendung der Theorie nach Whitham (1974) (zitiert in Thomas 1990) und der Berücksichtigung von Amplituden- und Wellenlängenmodulationen unter einer langsam variierenden Strömung, gesehen.

Die Turbulenzverteilung in der Strömung ist eine bedeutende Komponente bei der Betrachtung der Wellen-Strömungs-Interaktion. Insbesondere der Einfluss auf die Entwicklung der Wellenlänge und der Geschwindigkeiten wird deutlich. Ein sich langsam anpassender Ansatz für finite Wellenamplituden auf konstanten Strömungen wird im Zusammenhang mit experimentellen Daten in Thomas (1990) aufgestellt.

Tabelle 1: Auflistung relevanter Autoren zur Wellen-Strömungs-Interaktion mit Kennzeichnung (X) der Schwerpunkte der jeweiligen Studie.

	<b>Autor</b>	<b>WP</b>	<b>SP</b>	<b>BA</b>	<b>EE</b>	<b>SE</b>	<b>T</b>	<b>PM</b>	<b>NM</b>
Einfluss von Strömung auf Wellenparameter	Dalrymple und Dean (1975)	X		X					
	Peregrine (1976)	X	X	X		X	X		
	Jonsson und Skovgaard (1978)	X		X	X				
	Brevik (1980)	X	X					X	
	Brevik und Aas (1980)	X	X					X	
	Herchenroder (1981)	X		X	X				
	Thomas (1981)	X	X	X			X		
	Peregrine und Jonsson (1983)	X	X	X				X	
	Jonsson und Christoffersen (1984)	X		X	X				
	Thomas (1990)	X					X		X
	Swan und James (1998)	X	X	X	X		X	X	X
	MacIver et al. (2006)	X	X	X				X	
	Toffoli et al. (2010)	X	X	X				X	
Toffoli et al. (2011)	X	X	X				X		
Einfluss von Wellen auf Strömungsparameter	Kemp und Simons (1982)	X	X	X				X	
	Kemp und Simons (1983)	X	X	X			X	X	
	Groenweg und Klopman (1998)		X						X
	Fredso et al. (1999)	X	X					X	
	Groenweg und Battjes (2003)	X	X				X	X	X
	Musumeci et al. (2006)	X	X				X	X	
	Faraci et al. (2008)	X	X				X	X	

WP = Wellenparameter; SP = Strömungsparameter; BA = Berechnungsansätze; EE = Energieerhaltung; SE = Strömungseigenschaften; T = Turbulenz; PM = Physikalische Modellierung; NM = Numerische Modellierung

Swan und James (1998) führen an, dass ein funktionierendes Wellen-Strömungsmodell die Dopplerverschiebung sowohl der Oberflächenströmung als auch der oberflächennahen Wirbelverteilung berücksichtigen muss. Die wesentlichen Eigenschaften der Wellen-Strömungs-Interaktion, wobei die Strömung über die Tiefe variiert, resultieren aus einer wechselseitigen Beeinflussung von Welle und Strömung, wobei beide Komponenten sich durch die jeweils andere verändern. Diese Wechselwirkungen sind sehr stark von Wirbeln abhängig. Besonders im Bereich von Uferunregelmäßigkeiten, wie Landzungen oder Prielen, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von turbulenten Strömungen sehr hoch (Peregrine und Jonsson 1983).

Die Beschreibung der Interaktion zwischen einer stetigen Strömung und eines regulären Wellenzuges kann, laut Thomas (1990), nur dann analytisch erfolgen, wenn sich die Welle rotationsfrei zu einer gleichmäßigen Strömung oder zu einer Strömung mit gleichmäßiger Turbulenzverteilung bewegt. Im Falle einer zufälligen Turbulenzverteilung ist die Berechnung auch von linearen Wellen nicht möglich und eine numerische Lösung zu suchen. Da in Thomas (1981) der Fokus auf linearen Wellen liegt, konzentriert sich die Arbeit von Thomas (1990) auf Methoden zum Umgang mit Wellen finiter Amplitude. Das in Thomas (1990) beschriebene Modell stellt eine lückenlose Beschreibung der Wellenkinematik dar, welche üblicherweise durch die Wellenlänge und die Geschwindigkeitsprofile unter der Welle charakterisiert wird.

Eine Zusammenfassung weiterer relevanter Literatur zur Wellen-Strömungs-Interaktion unter Nennung der Schwerpunkte der jeweiligen Studie ist in Tabelle 1 aufgelistet. Eine weiterführende Diskussion deren Inhalte ist in Lieske et al. (2017) aufgeführt.

### 2.1.1 Physikalische Modellversuche zur Wellen-Strömungs-Interaktion

Auch Ergebnisse aus physikalischen Modellversuchen stellen Erkenntnisse zur Wellen-Strömungs-Interaktion bereit. Brevik und Bjørn (1979) sehen im Phänomen der Wellen-Strömungs-Interaktion ein beträchtliches praktisches Interesse. Sie adressierten drei Fragestellungen bezüglich der Wellen-Strömungs-Interaktion:

- die Änderung der Wellen-Amplitude nach der Wellenausbreitung über einer folgenden oder entgegengesetzten Strömung,
- den Unterschied in der Wellen-Abschwächung mit und ohne Strömung und somit der Bestimmung des Wellen-Strömungs-Reibungsfaktors  $f_{wv}$  und
- die Reduktion der mittleren horizontalen Geschwindigkeitsverteilung der Strömung.

Bezüglich der oben genannten Fragestellungen führten Brevik und Bjørn (1979) verschiedene großmaßstäbliche Versuche in einem Wellenkanal (Sjøfrid, NTNU Trondheim) mit Strömungsinduktion und großmaßstäblich welliger Sohle durch. Die Änderung der Wellenamplituden befand sich im Bereich der theoretischen Berechnungen, insofern es sich um nichtbrechende Wellen handelte. Die wellige Sohle war maßgeblich für die Abschwächung der Wellen verantwortlich. Für den Fall einer Periode von  $T = 2,0$  s wurden die Wellen-Strömungs-Reibungsfaktoren  $f_{wv}$  ermittelt. Aus den Messungen der horizontalen Geschwindigkeitsprofile mit einem Messflügel ging hervor, dass zwischen den Profilen mit freier Oberfläche und den horizontalen Geschwindigkeitskomponenten nur eine kleine bis gar keine Phasenverschiebung vorlag. Dieses Verhalten wurde bereits durch die von Brevik

und Bjørn (1979) genutzte Theorie prognostiziert. Hierbei ist zu hinterfragen, ob ein Messflügel, welcher Geschwindigkeiten nur in einer Dimension aufnehmen kann, die durch Turbulenzen hervorgerufenen dreidimensionalen Prozesse ausreichend abbildet. Des Weiteren wurde durch Brevik und Bjørn (1979) eine Reduktion der mittleren horizontalen Geschwindigkeit bei Wellenpräsenz festgestellt. Die Zielsetzungen in Brevik (1980) entsprachen denselben Kriterien wie in Brevik und Bjørn (1979), mit dem Unterschied, dass die Versuche in einem kleineren Wellenkanal mit höheren Strömungsgeschwindigkeiten und einer glatten Sohle stattfanden. Dadurch wurde es ermöglicht eine größere Bandbreite an Experimenten durchzuführen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen in Brevik und Bjørn (1979) wurde eine Phasenverschiebung von ca.  $30^\circ$  zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Oberflächengeschwindigkeit identifiziert. Ebenfalls trat eine Reduktion der mittleren horizontalen Strömungsgeschwindigkeit unter Welleneinfluss auf. Brevik (1980) beobachtete eine hohe Korrelation zwischen der Theorie und den experimentell ermittelten Ergebnissen.

Die Untersuchung der Wellen-Strömungs-Interaktion in Thomas (1981) erfolgte auf Basis eines regulären Wellenzuges auf einer entgegengesetzt gerichteten Strömung, der Berücksichtigung einer Turbulenzverteilung in zwei Dimensionen sowie der Verwendung der linearen Wellentheorie. Zur Vorhersage der Wellenlänge und der Partikelgeschwindigkeit unter der Welle bedurfte es der Verwendung eines numerischen Modells, welches durch experimentelle Daten kalibriert und validiert wurde.

In physikalischen Modellversuchen sollte der mittlere Stand des Wasserspiegels bekannt sein, welcher sich im Allgemeinen vom Ruhewasserstand unterscheidet (Peregrine und Jonsson 1983). Diese Differenz kann aufgrund einer Umverteilung des Wassers an der Oberfläche durch die Bewegung der Wellenmaschine und deren generierte Wellen auftreten. Dieser Modelleffekt kann besonders bei sehr steilen, irregulären Tiefwasserwellen zur Geltung kommen, da es bei brechenden Wellen zu einem Impulsaustausch mit der Strömung kommt, wird diese im Normalfall verstärkt (Peregrine und Jonsson 1983).

Für die Untersuchung von Swan und James (1998) wurden Versuche in einem kombinierten Wellen-Strömungskanal im hydraulischen Laboratorium des Imperial College in London unternommen. Der Kanal hatte eine Länge von 25 m, eine Breite von 0,3 m und eine Tiefe von 0,7 m. Die Wellenerzeugung erfolgte durch ein computergesteuertes Klappen-Wellenpaddel, wohingegen die Strömungserzeugung mittels dreier Rohrstrrecken mit geschlossenem Kreislauf und integrierten Pumpen realisiert wurde. Der maximale Durchfluss der Strömung betrug  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$  und konnte beidseitig beaufschlagt werden. Die Messwerterfassung erfolgte mithilfe von Wellenpegeln (für die Wasserspiegelauslenkung) und einem Laser-Doppler-Anemometer für die Partikelgeschwindigkeiten.

Swan und James (1998) ermittelten Änderungen im Wellenspektrum, indem zuerst Wellen (Pierson-Moskowitz-Spektrum) ohne Strömung erzeugt wurden und anschließend exakt die gleichen Wellen mit einer zusätzlichen, unterhalb fließenden Scherströmung kombiniert belastet wurden. Es wurden dieselben Methoden der Messwerterfassung angewendet. Da beide Methoden, die analytische als auch die numerische Methode, die Dopplerverschiebung und die Turbulenzverteilung berücksichtigen, sind die ermittelten, iterativen Ergebnisse von Swan und James (1998) sehr nah am gemessenen Spektrum. Ältere Methoden ziehen zumeist nur die Dopplerverschiebung in ihre Berechnungen mit ein, nicht

jedoch die Turbulenzverteilung. Des Weiteren zeigt sich, dass die Bedeutung der Turbulenzverteilung äquivalent zur Dopplerverschiebung sein kann, wenn der Einfluss von Scherströmungen vorherrscht (Swan und James 1998).

Auch Strömungen wurden von Swan und James (1998) ohne Einfluss von Wellen gemessen, um ihr ursprüngliches Strömungsfeld aufzuzeichnen und diese Daten in den soeben erwähnten Berechnungen zu verwenden. Es wurde festgestellt, dass die Änderung der Strömungsmagnitudo im Verhältnis zur Wellenhöhe bzw. Wellensteilheit steht. Die Wellensteilheit stieg mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit an. Aus der Analyse der regelmäßigen Wellen ging hervor, dass in einem unregelmäßigen Wellenspektrum mit einer kontinuierlichen Veränderung der Strömungscharakteristika zu rechnen ist. Dies erschwerte die Separation von Bewegungskomponenten im Fluid, die individuell aus den komplexen Wechselwirkungen aus Wellen und Strömung resultieren, signifikant.

MacIver et al. (2006) untersuchten die Umwandlung von nichtlinearen Wellen während der Fortbewegung auf einer schmalen, strahlähnlichen, horizontal verlaufenden Strömung, in einem Wellenbecken mit Strömungserzeugung in Wallingford, England. Dabei wurde der Angriffswinkel der Wellen auf die Strömung so variiert, dass sie, je nach Versuchsaufbau, entweder orthogonal ( $90^\circ$ ) oder schräg (gleichgerichtet ( $60^\circ$ ), entgegengerichtet ( $120^\circ$ )) aufeinander trafen. Die Wellencharakteristika wurden nicht verändert, so dass sie untereinander vergleichbar blieben. Das Längenverhältnis der Strömung war vergleichbar mit der einfallenden Wellenlänge (MacIver et al. 2006). Die aus den Versuchen resultierenden Datensätze boten die Möglichkeit des direkten Vergleichs der Versuchsvarianten, bezüglich der Kinematik und Dynamik der Wellen-Strömungs-Interaktion. Der Fokus der Wellen-Strömungs-Interaktion lag auf der Veränderung der Oberflächenauslenkung und der Strömungsprofile.

Das Fehlen von aussagekräftigen Untersuchungen der Wellen-Strömungs-Interaktion in drei Dimensionen kann durch die Tatsache begründet werden, dass es bis Ende des letzten Jahrtausends keine passenden Versuchsanlagen gab (Thomas und Klopman (1997), zitiert in MacIver et al. (2006)). Dies hatte sich mit dem Bau des Wellenbeckens in Wallingford, England im Jahr 1995 geändert, da dieses Wellenbecken in der Lage war, im großen Maßstab und in drei Dimensionen die Wellen-Strömungs-Interaktion nachzubilden.

Es erfolgte eine orthogonal zur Wellenmaschine verlaufende, strahlähnliche, ca. 4,0 m breite Scherströmungsgenerierung in der Mitte des Wellenbeckens. Die erforderliche Entwicklungslänge der Strömung in Längsrichtung betrug das Zehnfache der Wassertiefe. Über die Breite der Scherströmung nahm die Geschwindigkeit der Strömung zu den Rändern hin ab, wobei sich ein Kernbereich mit relativ konstanter Geschwindigkeit von ca. 2,0 m Breite herausbildete. Mit zunehmendem Abstand zur Strömungseinleitung nahm die Strömungsamplitude ab und Streuungen nahmen zu. Während der Versuche traten klein- und großräumige, turbulente Strukturen in der Strömung auf, die eine Länge von bis zu 2,4 m und eine Periode von bis zu 300 s aufwiesen. Diese Parameter konnten nach der „gefrorenen Konvektions-Methode“ nach Taylor (1938) berechnet werden (MacIver et al. 2006). Es wurden vernachlässigbare Reflexionen der einlaufenden Wellen am Strömungsrand der Strömung festgestellt. Es stellte sich ebenfalls das typische Refraktionsverhalten der Wellen ein, bei dem eine der Strömung folgende Welle sich parallel zur Strömung ausrichtet und sich durch erhöhte Wellenlängen und reduzierte Wellenhöhen auszeichnet (MacIver et al. 2006). Eine der Strömung entgegengesetzte Welle verhielt sich entgegengesetzt und war geprägt durch eine eher normale Ausrichtung an der Strömung sowie kürzeren

Wellenlängen und gesteigerten Wellenhöhen (MacIver et al. 2006). Diese sich verändernden Eigenschaften der Wellen konnten von MacIver et al. (2006) mit einem relativ einfachen Wellenstrahlmodell berechnet werden, welches die Transformation der Wellen auf einer sich über die Tiefe konstant und langsam variierenden Strömung berücksichtigte. Die Berechnung mit einem anspruchsvolleren Strömungs-Annäherungsmodell, welches die effektive vertikale Spannung berücksichtigt, zeigte keine besonderen Verbesserungen bezüglich der Prognose. Jedoch war eine weitere Verfolgung des Einflusses der vertikalen Spannungen erstrebenswert.

Für die Untersuchung zur Entstehung von Freak Waves und dem Einfluss einer Strömung auf dieses Phänomen, wurden Experimente in einem multi-direktionalen Wellenbecken unter Aufschlag von Strömung durchgeführt (Toffoli et al. 2010). Die Untersuchungen fokussierten thematisch die nichtlineare Dynamik von Oberflächenwellen und das Auftreten von extremen Wellenereignissen, im Fall eines schräg auf eine Strömung treffenden Wellenfeldes. Toffoli et al. (2010) führten eine Vielzahl von Versuchen mit entgegengesetzter, gleichmäßiger Strömung durch. Gemäß der linearen Dispersionsrelation wurde davon ausgegangen, dass die Wellenlängen sich beim Kontakt mit einer entgegengesetzten Strömung verkürzen und sich die Wellen in diesem Zuge stärker aufsteilen. Dadurch wird ein Hervorrufen nicht-linearer Prozesse generell wahrscheinlicher. Das Ziel der Versuche war die Analyse, inwiefern das Aufsteilen der Wellen durch die Wellen-Strömungs-Interaktion das Entstehen von extremen Wellen begünstigt. Es stellte sich heraus, dass die Interaktion von regulären Wellen mit einer teilweise entgegengesetzten Strömung zu einer Zunahme der nichtlinearen Effekte führt. Für unregelmäßige Wellen kann die Wahrscheinlichkeit von extremen Wellen mit Hilfe der Berechnung der vorherrschenden Kurtosis bestimmt werden (Toffoli et al. 2010).

Laborversuche im Zusammenhang mit der Dynamik von dreidimensionalen, mechanisch generierten Wellen über einer schrägen, teilweise entgegengesetzten Strömung sind in Toffoli et al. (2011) aufgeführt. Die Versuche fanden, wie schon zuvor in Toffoli et al. (2010), im Ocean Wave Laboratory von Marintek in Trondheim statt. Die Fließgeschwindigkeit variierte in Richtung der mittleren Wellenfortschrittsrichtung mit einem ansteigenden Trend. Tests mit regulären Wellen entgegen der Strömungsrichtung zeigten eine Zunahme der Wellensteilheit und somit ein begünstigendes Verhalten für das Auftreten von sehr großen Wellenamplituden. Bei unregelmäßigen Wellenspektren resultierte die Gegenwart einer schrägen Strömung in einer schwachen Verstärkung der Welleninstabilität und einer höheren Wahrscheinlichkeit von extremen Wellenereignissen (Toffoli et al. 2011).

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden im Projekt folgende Faktoren identifiziert, die zur Vertiefung des Prozessverständnisses der Wellen-Strömungs-Interaktion beitragen:

- Anpassung der Forschungsinfrastruktur (Wellenbecken) zur Generierung eines homogenen Strömungsfeldes über die gesamte Breite des Versuchsstandes zur Vermeidung von Modelleffekten (vgl. MacIver et al. 2006).
- Dreidimensionale und hochfrequente Messung von Strömungskomponenten im physikalischen Modell zur Identifikation und Quantifizierung von Turbulenzänderungen.
- Identifikation des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit auf die Phasenverschiebung in Bezug auf die Oberflächengeschwindigkeit.
- Quantifizierung der Veränderung von nichtlinearen Effekten durch die Interaktion von Wellen mit Strömungen und deren zeitliche Zuordnung (vgl. Toffoli et al. 2010).

### 3 Physikalische Modellversuche zur Wellen-Strömungs-Interaktion

Die empirischen Untersuchungen zur schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion, die im Rahmen des Forschungsprojekts „Seegangsbelastungen“ (*Seele*) durchgeführt wurden, werden im Folgenden beschrieben. Dabei stehen die Zielsetzung und Methodik in diesem Beitrag im Vordergrund. Eine ausführliche Dokumentation über die Messtechnik, die Versuchseinrichtung, den Versuchsaufbau, das Versuchsprogramm und die Versuchsdurchführung der physikalischen Modellversuche ist in Lieske et al. (2017) aufgeführt.

#### 3.1 Zielsetzung und Methodik

Zur Untersuchung der physikalischen Prozesse bei der Wellen-Strömungs-Interaktion (wave current interaction - WCI) sind entsprechende Modellversuche nach wie vor notwendig. Sie bilden dabei vereinfacht die natürlichen Prozesse unter kontrollierten Randbedingungen ab. Die Ergebnisse aus den Versuchen werden u. a. zur Bewertung analytischer Ansätze und Kalibrierung numerischer Modelle benötigt. Besonders für den Fall der schrägen WCI (d. h. die Wellenrichtung zur Strömungsrichtung verläuft schräg oder orthogonal zueinander) besteht ein großer Bedarf an Messergebnissen aus physikalischen Modellversuchen. Die übergeordnete Zielsetzung bei den durchgeführten Messungen beinhaltet ein vertieftes Verständnis und Wissen zum Wellenverhalten bei schräger oder orthogonaler WCI für unterschiedliche Wellenperioden, Wellenrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten.

Daher ist für die Ermittlung der physikalischen Zusammenhänge der WCI wie folgt vorzugehen:

- (i) Strömungsversuche ohne Wellen (current alone – CA) und Strömungsanalyse, um die ungestörten Strömungsverhältnisse zu erfassen.
- (ii) Wellenversuche ohne Strömung mit Wellenanalyse ohne Strömung (wave alone – WA), um die ungestörten Wellenverhältnisse zu erfassen.
- (iii) Schräge und orthogonale Wellen-Strömungsversuche (wave-current – WC) und deren Analyse, um die veränderten Wellenverhältnisse zu erfassen.
- (iv) Vergleichsanalyse, um die Abweichungen zwischen CA, WA und WC zu ermitteln und damit die Effekte der schrägen und orthogonalen WCI aufzuzeigen.

Das erste Ziel der Strömungsversuche ohne Wellen und der Wellenversuche ohne Strömung war, die Erfassung und Dokumentation der Verhältnisse im 3D-Wellen-Strömungsbecken bzgl. der Strömungsanlage und der passiven Wellenabsorber zu ermitteln. Ein weiteres Ziel lag darin, eine Datengrundlage für die anschließende Vergleichsanalyse zu den schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungsversuchen zu schaffen. Durch diese Methodik können Aussagen über Modelleffekte der Versuchseinrichtung und die Effekte der schrägen und orthogonalen WCI getroffen werden. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die Modellversuche wurden im Maßstab 1:10 nach dem Ähnlichkeitsgesetz von Froude für den Küstennahbereich mit nichtbrechenden Wellen (KFKI 2015) durchgeführt. Die in den Versuchen verwendeten Parameter bilden Wellen- und Strömungsereignisse in der Nordsee vornehmlich im Bereich der Ostfriesischen Küste und deren vorgelagerten Inseln

ab. Die vorhandenen Wellen- und die Strömungsverhältnisse in dem Bereich der Nordsee können dem Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste (Mai 2004) und dem Strömungsatlas der BSH (Dick et al. 2010) entnommen werden.

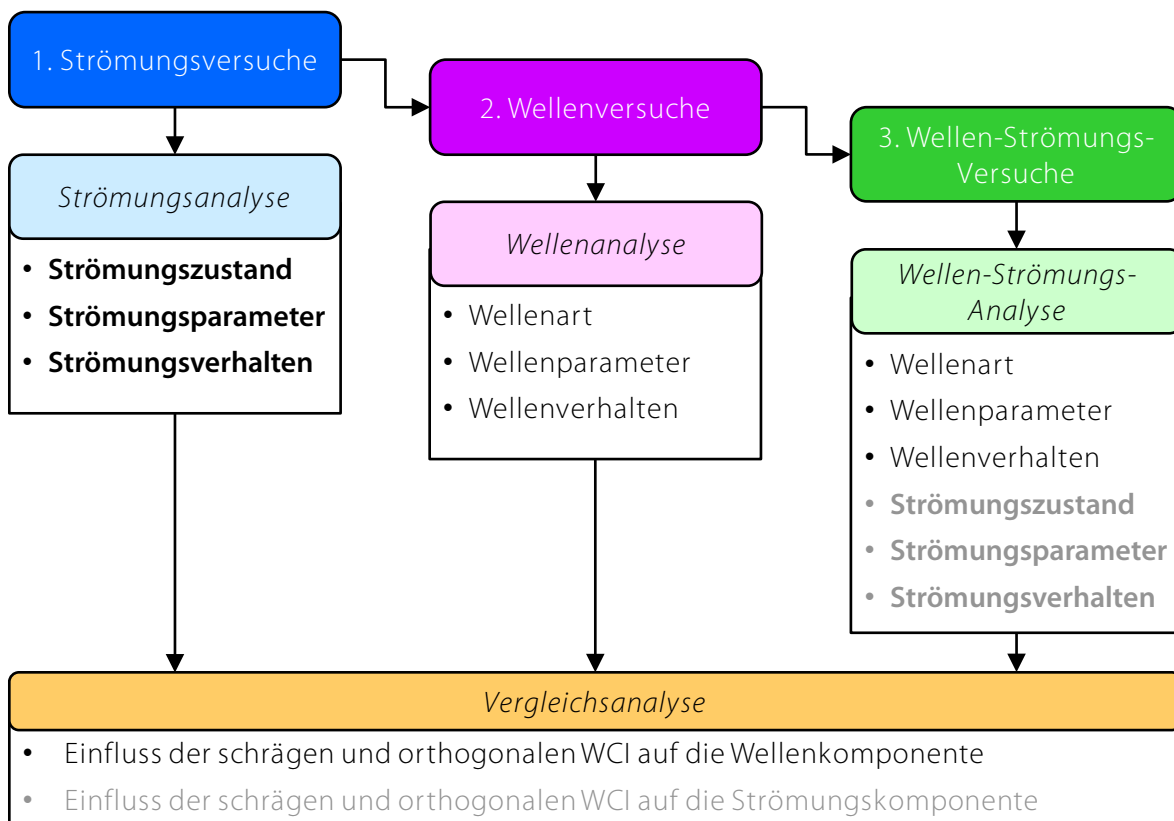


Abbildung 4: Methodik der physikalischen Modellversuche zur schrägen WCI.

### 3.2 Datenauswertung

Die Messdaten aus den Wellen-Strömungsversuchen wurden mittels der Frequenz- und Zeit-Frequenzanalyse analysiert. Der Fokus der Auswertung für die Strömungsversuche wurde dabei insbesondere auf ermittelte Strömungsgeschwindigkeiten, die Auswahl geeigneter Filterkriterien, die Definition von Qualitätskriterien für Messwerte und den Einfluss der Messdauer auf mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten gelegt. Für die Auswertung der Wellenversuche wurde der Fokus auf die 3D-Wellenanalyse gelegt, mit deren Hilfe Vergleiche von Soll- und Ist-Wellenhöhen und -Richtungen adressiert werden. Zudem wurden Reflexionskoeffizienten in Abhängigkeit von Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung für das Wellenbecken ermittelt. Eine detaillierte Dokumentation der vollzogenen Auswertung der Daten kann Lieske et al. (2017) entnommen werden.

## 4 Ergebnisse der Wellen-Strömungsversuche

Durch eine Auswertung der zu Grunde liegenden Daten (i) im Frequenzbereich mittels der Fourier-Transformation (FT) und (ii) im Zeit-Frequenzbereich mittels der Hilbert-Huang-Transformation (HHT) konnten Abhängigkeiten der Wellen-Strömungs-Interaktion bestimmt werden. Die Fourier-Transformation ist eine mathematische Methode, mit der

z. B. irregulärer Seegang in seine periodischen Einzelkomponenten (regelmäßige Wellen verschiedener Amplitude, Frequenz und Phasenverschiebung) aufgegliedert werden kann. Die Hilbert-Huang-Transformation bietet eine Möglichkeit, Seegang zusammen mit einem Trend in sogenannte Intrinsic-Mode-Funktionen (IMF) zu zerlegen und Momentanfrequenzdaten zu erhalten. Sie eignet sich daher gut zur Auswertung von nicht stationären und nichtlinearen Daten. Für beide Auswertungen kann die detaillierte Implementierung der Routinen sowie die zugehörige Aufbereitung der Messdaten in Lieske et al. (2017) nachgeschlagen werden. Grundlagen zur Seegangsanalyse im Zeit- und Frequenzbereich sind in Die Küste, Heft 65, Kapitel 3.6.3.3 (KFKI 2015) gegeben. Im Nachfolgenden wird explizit auf die Reproduzierbarkeit der einzelnen Versuchsreihen sowie eine Bewertung und einen Vergleich der gewonnenen Erkenntnisse eingegangen.

#### 4.1 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Versuche stellte ein wichtiges Kriterium dar, um eine belastbare Deutung von Analyseergebnissen vornehmen zu können. Zur Untersuchung der Versuche und der Wiederholungsversuche hinsichtlich ihrer Übereinstimmung wurden die Fourierspektren der Messungen miteinander verglichen.

Für die Wellenversuche, deren Versuchsreihen aus einem Versuch und zwei Wiederholungsversuchen bestehen, konnte für alle Versuche eine gute Übereinstimmung zwischen den Amplitudenspektren festgestellt werden. Die Frequenzen der Signalkomponenten stimmten innerhalb der Versuchsreihe überein. Auch die Abweichungen zwischen den berechneten Amplituden der entsprechenden Peaks im Spektrum waren in allen Fällen geringer als 2 mm (2 %).

Auch für die Versuchsreihen der kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche, die sich aus nur einem Versuch und einem Wiederholungsversuch zusammensetzten, konnte festgestellt werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den Amplitudenspektren vorlag. Die Abweichungen zwischen den Amplituden eines Versuchs und seines Wiederholungsversuchs betragen mit einer Ausnahme maximal 2,1 mm (2 %). Die Frequenzen der sich entsprechenden Peaks im Amplitudenspektrum innerhalb einer Versuchsreihe stimmten bei Ausschluss eines Einzelversuches noch besser überein, hier betrug die größte Abweichung weniger als 1 %.

#### 4.2 Bewertung und Vergleich

Die Fourieranalyse der Wellenversuche ohne Strömung hat ergeben, dass die Amplitudenspektren dieser Versuche sich von den zuvor ermittelten Referenzfällen unterscheiden. Die Spektren der gemessenen Wellen enthalten nicht wie erwartet zwei sondern insgesamt fünf bis sechs Komponenten höherer Ordnung.

Für das Vorhandensein der überzähligen Peaks sind zwei mögliche Gründe denkbar: (i) Die hochfrequenten Peaks stellen Reflexionsanteile der Welle dar oder (ii) deuten auf eine weitere Verformung der Welle hin, aus der eine Welle der Stokes-Theorie höherer Ordnung resultiert. Die zweite Vermutung ließe sich über die Betrachtung der Phasenfunktion überprüfen, welche jedoch nicht durchgeführt wurde.



Für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der Peaks höherer Ordnung geringer ausfällt als bei den Spektren der WA-Versuche: Die in den WA-Spektren sichtbaren Peaks ab der dritten Ordnung waren in den meisten Fällen im Amplitudenspektrum der WCI-Versuche nicht präsent. Das Wegfallen der höheren Peaks während der Anwesenheit einer Strömung lässt vermuten, dass infolge der Strömung hochfrequente Anteile mit einer vergleichsweise sehr geringen Amplitude eliminiert werden und somit eine Verformung der Welle stattfand. Die Linearität der Welle nahm mit Anwesenheit der Strömung zu. Die Betrachtung der Abszissenwerte der Peaks in den Spektren ließ deutlich werden, dass für alle WCI-Versuche innerhalb einer Wellenperiode unabhängig von der Strömungsstärke identische Basisfrequenzen und Frequenzen der jeweiligen Höherharmonischen vorlagen. Gleichzeitig konnten keine Unterschiede zwischen den Basisfrequenzen der WCI-Versuche zu den Frequenzen der WA-Versuche ermittelt werden. Dies bedeutet, dass die Wellenperiode trotz einer anwesenden Strömung, unabhängig von deren Durchfluss, unverändert bleibt.

Daneben konnte festgestellt werden, dass in den Amplitudenspektren der WCI-Versuche Seitenbandfrequenzen auftraten. Seitenbänder treten im Verlauf von Modulationsinstabilitäten in Erscheinung und sind ein Kennzeichen für nichtlineare Vorgänge während der Wellenausbreitung. Es zeigte sich, dass die Anzahl der Seitenbänder desto größer ausfällt, je stärker die Strömung und je kleiner die Wellenperiode sind.

Die Fourier-Analyse und die Berechnung von Amplitudenspektren sind demnach geeignet, um Rückschlüsse auf die Wellenform sowie auf Veränderungen der Form und der Nichtlinearität infolge der Wellen-Strömung-Interaktion zu ziehen. Mithilfe der Amplitudenspektren sind außerdem Veränderungen der Frequenz bzw. der Wellenperiode feststellbar. Gut geeignet ist die Fourier-Analyse zum Auffinden von Seitenbandinstabilitäten. Sie gibt somit Hinweise auf das Auftreten von Modulationsinstabilitäten, die möglicherweise durch den Einfluss der Strömung entstehen. Die Auswertung der Fourierspektren liefert allerdings keinen Zeitbezug. Die Prozesse konnten demzufolge identifiziert werden, jedoch nicht der Zeitpunkt ihres Eintretens sowie die Häufigkeit ihres Auftretens während des Versuchs.

Aus diesem Grund wurde als weitere Analysemethode die Hilbert-Huang-Transformation (HHT) angewendet. Im Gegensatz zur Fourier-Analyse liefert die HHT zeit-frequenz-abhängige Spektren. Die HHT wurde durch Huang et al. (1998) entwickelt und stellt eine Erweiterung der Hilbert-Analyse dar. Die Hilbert-Analyse ist ein bewährtes Verfahren zur Zeit-Frequenz-Analyse von nichtlinearen und instationären Prozessen. Ein Kennzeichen für ein nichtlineares System sind zeitabhängige Veränderungen der Frequenz eines Signals. Um die Anwendung der Hilbert-Analyse auf breitbandige Signale zu ermöglichen, entwickelten Huang et al. (1998) die Methode der Empirical Mode Decomposition (EMD). Mithilfe der EMD kann die empirische Zerlegung eines breitbandigen in schmalbandige Signale erfolgen, indem das Ursprungssignal in seine charakteristischen Wellenanteile, die sogenannten Intrinsic Mode Functions (IMF), aufgespalten wird. Eine Hilbert-Transformation der IMFs liefert schließlich ein zeitabhängiges Frequenz- und Amplitudenspektrum, das sogenannte Hilbert-Spektrum.

Die Hilbert-Huang-Analyse des Wellenversuchs ohne Strömung hat ergeben, dass ein generiertes Wellensignal entgegen den Erwartungen zwei gleichzeitig auftretende Komponenten enthielt, welche in zwei Intrinsic Mode Functions (IMFs)  $c_4$  und  $c_5$  wiedergegeben werden konnte. IMFs stellen dabei die in einem Datensatz eingebetteten Schwingungsmodi

dar. Die Berechnung des Grades der Nichtlinearität bestätigte, was bereits durch die Schwankungsbreite der IMFs im Hilbert-Spektrum deutlich wurde: Die Nichtlinearität beider Komponenten unterschied sich voneinander. Ein Beispiel für die fünfte IMFs der Wellen-Strömungs-Interaktion für Versuche mit variierendem Durchfluss ist in Abbildung 5 gegeben.

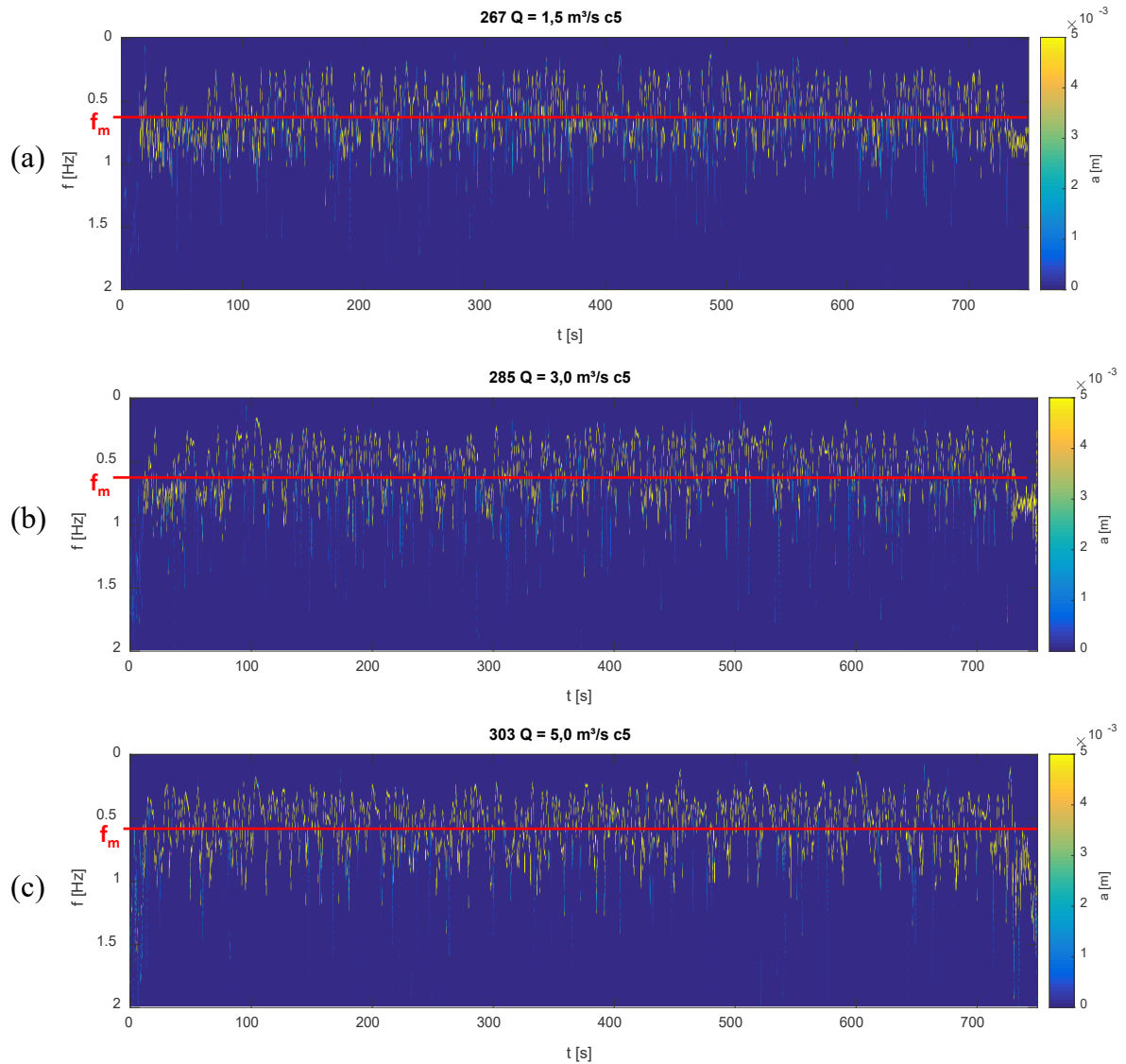


Abbildung 5: Fünfte IMFs der Wellen-Strömungs-Versuche mit Angabe des Frequenzmittelwertes  $f_m$ : (a) Versuch 267 ( $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (b) Versuch 285 ( $Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ), (c) Versuch 303 ( $Q = 5,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Das Signal, welches in der vierten IMF wiedergegeben wurde, zeigte jedoch eine gute Übereinstimmung mit dem Wellensignal. Dies spiegelte sich im Hilbert-Spektrum wider: Der Verlauf der vierten IMF beschrieb eine gleichmäßige Oszillation, welche für Stokes'sche Wellen zu erwarten war. Der Frequenzmittelwert der Schwingung stimmte zudem mit der Frequenz des Wellensignals überein. Die fünfte IMF hingegen zeigte eine größere Schwankungsbreite und zudem einen etwas geringeren Frequenzmittelwert und reproduzierte demnach einen anderen Oszillationsmodi und nicht einen durch *mode mixing* abgespaltenen Anteil. Bei der Betrachtung der vierten IMF fiel auf, dass die Schwankungsbreite der Oszillation variierte und erst ab  $t = 400 \text{ s}$  einen unveränderten Zustand erreichte. Demnach

schwankten die Linearität und damit die Wellenform des Signals während der Versuchsdurchführung. Die Ursache hierfür sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche konnte festgestellt werden, dass die Information des Eingangssignals für alle Versuche ebenfalls in zwei IMFs  $c_4$  und  $c_5$  vorlag. Die vierte IMF, deren Frequenz mit dem Eingangssignal übereinstimmte, enthielt nicht nur die Information der unbeeinflussten Welle, sondern reproduzierte erwartungsgemäß die bereits verformte Welle.

Der Verlauf der vierten IMFs im Hilbert-Spektrum zeigte ebenfalls eine Oszillation, die jedoch eine variierende Schwankungsbreite besaß. Die mittlere Schwankungsbreite unterschied sich für die verschiedenen Strömungsdurchflüsse. Dementsprechend konnten für die vierten IMFs der verschiedenen WCI-Versuche unterschiedliche Grade der Nichtlinearität festgestellt werden. Die Hilbert-Spektren der fünften IMFs unterschieden sich von denen der vierten IMFs: Wie im WA-Fall zeigten die IMFs eine größere Schwankungsbreite und einen von den vierten IMFs abweichenden Frequenzmittelwert. Die ermittelten Grade der Nichtlinearität bestätigten dies.

Im nächsten Schritt erfolge eine Quantifizierung der Nichtlinearitäten. Huang et al. (2013) führen einen sogenannten Grad der Nichtlinearität (Degree of Nonlinearity,  $DN$ ) ein, welcher mithilfe der im Hilbert-Spektrum dargestellten Momentanfrequenz bestimmt werden kann zu:

$$DN' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \left[ \left( \frac{f_{j,inst.} - f_{const.}}{f_{const.}} \right) \frac{a_z}{\bar{a}_z} \right]^2} \text{ mit } 0 \leq DN \leq 1, \tag{1}$$

mit

- $DN$ : Grad der Nichtlinearität [-],
- $f_{inst.}$ : Momentanfrequenz [Hz],
- $f_{const.}$ : konstante Frequenz einer linearen Welle mit der gleichen Periode,
- $a_z$ : Amplitude zwischen zwei Nulldurchgängen einer lokalen Welle,
- $\bar{a}_z$ : Mittelwert von  $a_z$ .

Die Bestimmung von  $DN$  beruht auf der Annahme, dass die Momentanfrequenz einer linearen kosinus- oder sinusförmigen wellentrigonometrischen Funktion als einer Sinuswelle konstant ist. Die Momentanfrequenz einer nichtlinearen Welle hingegen variiert innerhalb einer Schwingungsdauer (Brühl 2014). Die Nichtlinearität eines untersuchten Signals wird anhand des Vergleichs seiner Momentanfrequenz mit der Momentanfrequenz einer linearen Welle innerhalb einer Schwingungsperiode ermittelt. Der Grad der Nichtlinearität nimmt für lineare Sinus- bzw. Kosinus-förmige Wellen einen Wert von  $DN = 0$  an und nimmt mit Größerwerden der Nichtlinearität eines Signals zu. Für regelmäßige Wellen ist nach Huang et al. (2013) der Einfluss der Amplituden weniger relevant, sodass Gleichung (1) angepasst wird zu

$$DN' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n \left( \frac{f_{j,inst.} - f_{const.}}{f_{const.}} \right)^2} \text{ mit } 0 \leq DN' \leq 1, \tag{2}$$

mit

- $DN'$ : Modifizierter Grad der Nichtlinearität [-]

In Abbildung 6 sind die berechneten Modifizierten Grade der Nichtlinearität  $DN'$  über den verschiedenen Strömungsdurchflüssen für die vierten (blaue Kreise) und fünften IMFs (rote Vierecke) des WA-Versuchs ( $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sowie der WCI-Versuche graphisch dargestellt. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass für die vierten IMFs der WCI-Versuche der Grad der Nichtlinearität des betrachteten Zeitfensters zwischen 400 s und 700 s für die Versuche mit  $Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q = 5,0 \text{ m}^3/\text{s}$  etwas größer ist als für den Versuch mit dem geringsten Strömungsdurchfluss. Ein Trend in Abhängigkeit des Strömungsdurchflusses ist gegeben. Im Vergleich zum WA-Versuch ist die Nichtlinearität der vierten IMFs der WCI-Versuche geringer.

Dieses Ergebnis spiegelt die Resultate aus der Fourier-Analyse wieder. Für die Amplitudenspektren der Messsignale dieser Versuchsreihe konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der Komponenten im Vergleich zum WA-Versuch für alle WCI-Fälle geringer war. Demnach hat auch die FFT gezeigt, dass die Nichtlinearität des Signals von WA zu WCI abnimmt. Des Weiteren hat die Fourier-Analyse ergeben, dass die Nichtlinearität für  $Q = 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  am geringsten ist und für höhere Durchflüsse wieder zunimmt. Die HHT für die vierten IMFs, für die festgestellt wurde, dass sie das Messsignal gut wiedergeben, zeigt demnach mit den Beobachtungen aus der FFT übereinstimmende Ergebnisse bezüglich der Nichtlinearität.

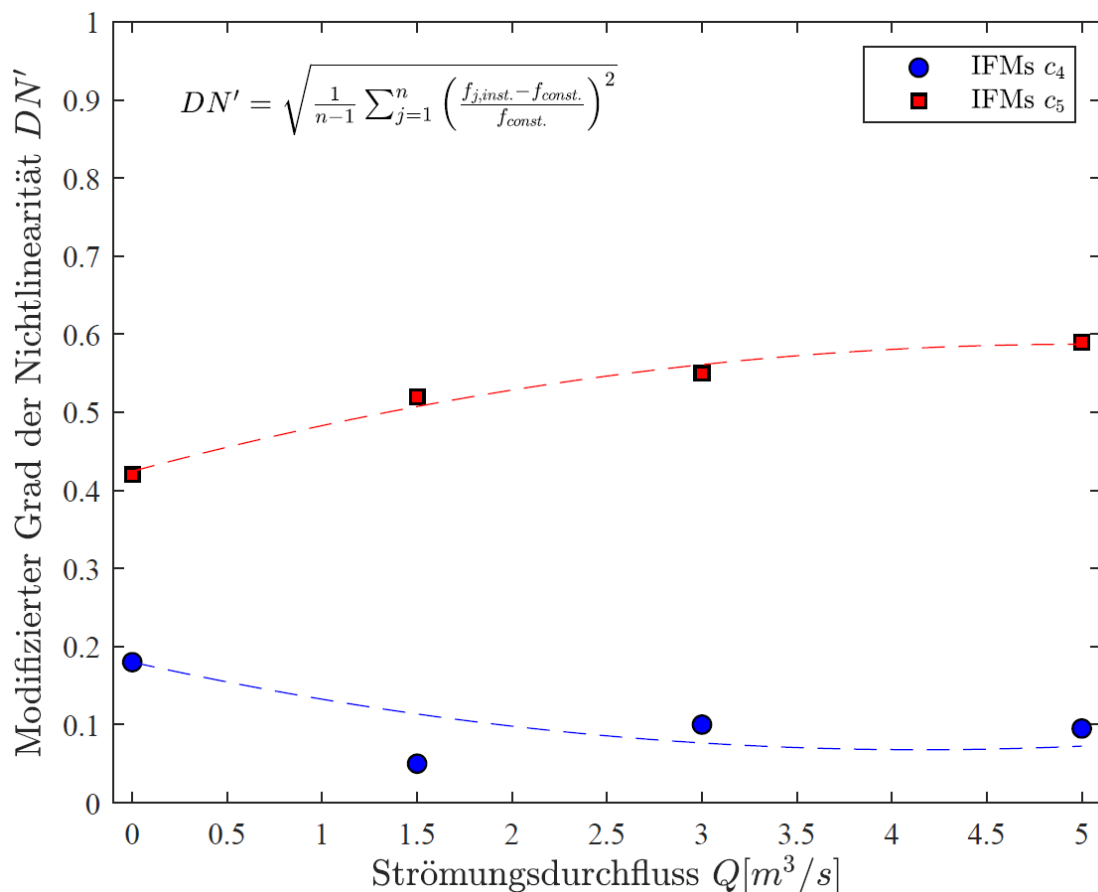


Abbildung 6: Modifizierter Grad der Nichtlinearität  $DN'$  in Abhängigkeit des Strömungsdurchflusses für die IMFs  $c_4$  und  $c_5$ .

Die graphische Darstellung der Grade der Nichtlinearität für  $c_5$  macht zum einen nochmals deutlich, dass die Nichtlinearität der fünften IMFs sich deutlich von  $DN'$  der vierten IMFs unterscheidet. Zum anderen wird ersichtlich, dass die Nichtlinearität mit Zunahme des

Strömungsdurchflusses größer wird. Allerdings nimmt die Nichtlinearität dieser IMF im Gegensatz zu der vierten IMF auch im Vergleich zum WA-Fall zu.

Anzumerken ist, dass für die Berechnung des Grades der Nichtlinearität ein Mittelwert über das Zeitfenster von 400 s gebildet wurde. Die für die vierten IMFs des WCI-Falls und für alle fünften IMFs starken Schwankungen im Hilbert-Spektrum werden möglicherweise nicht ausreichend durch einen Mittelwert repräsentiert. Für zukünftige Untersuchungen ist daher zu empfehlen, eine detaillierte Analyse einzelner Schwingungen durchzuführen.

Die Anwendung der Hilbert-Huang-Analyse auf die hier untersuchten Versuche ermöglichte, die Eingangssignale des Wellenversuchs und der Wellen-Strömungs-Versuche als schmalbandige Signale in einer IMF wiederzugeben. Durch die Darstellung der IMFs in den Hilbert-Spektren war es möglich, Unterschiede zwischen dem WA-Fall und dem WCI-Fall festzustellen: Für einen Vergleich konnten im Rahmen dieser Untersuchung (i) der Kurvenverlauf der IMFs im Hilbert-Spektrum, (ii) die Schwankungsbreite der dargestellten Frequenzen sowie deren Mittelwert und (iii) der Grad der Nichtlinearität, der aus den Momentanfrequenzen der IMF berechnet wird, herangezogen werden.

Ein Vorteil der HHT gegenüber der Anwendung der Fourier-Analyse war die Möglichkeit der zeitlichen Zuordnung verschiedener Prozesse. Beispielsweise konnte für den Wellenversuch festgestellt werden, dass die Schwankungsbreite des im Hilbert-Spektrum dargestellten Signals und somit die Nichtlinearität im Versuchsverlauf variiert.

### 4.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Frequenzanalyse und Zeit-Frequenzanalyse

Die Fourier-Transformation der Versuchsdaten hat gezeigt, dass die Wellensignale aus den Versuchen nicht den nominalen generierten Wellen entsprachen. Gemäß den FFT-Spektren entsprachen die gemessenen Wellen nicht der zu erwartenden Stokes'schen Wellentheorie 2. Ordnung, sondern waren einer Wellentheorie 5. oder 6. Ordnung zuzuordnen. Des Weiteren wichen die aus den Amplitudenspektren ermittelten Wellenhöhen von den vorgegebenen Wellenhöhen ab. Die Hilbert-Huang-Analyse des untersuchten Wellensignals hat ebenfalls gezeigt, dass es sich bei dem Messsignal um eine Welle höherer Ordnung handelte, dessen Grad der Nichtlinearität  $DN'$  im für die FFT betrachteten Zeitfenster zwischen 400 s und 700 s einen Wert von 0,18 annahm. Anhand der Ermittlung von Nichtlinearitätsgraden für generisch erzeugte Referenzfälle sollte im Rahmen künftiger Analysen für den ermittelten Wert untersucht werden, welcher Theorie höherer Ordnung die Welle laut der HHT exakt zuzuordnen ist.

Mithilfe des Hilbert-Spektrums konnte eine zeitliche Veränderung der Linearität des Signals festgestellt werden. Die Linearität des Signals war zum Zeitpunkt  $t = 100$  s und bis  $t = 400$  s höher als in der restlichen Zeitreihe. Zwar konnte für das in der FFT betrachtete Zeitfenster anhand des Hilbert-Spektrums festgestellt werden, dass von einer konstanten Linearität auszugehen ist – eine zeitliche Zuordnung der Linearität bzw. eine Veränderung der Linearität des Signals während der gesamten Versuchsdauer konnte mit der FFT nicht identifiziert werden.

Sowohl die FFT als auch die HHT ergaben für einen mit beiden Methoden untersuchten Versuch ( $H = 0,066$  m;  $T = 1,2$  s;  $\theta = 70^\circ$ ), dass die Frequenz des Messsignals einen Wert von 0,83 Hz aufweist und somit mit der Frequenz der generierten Welle übereinstimmt. Die Übereinstimmung der gemessenen Frequenzen mit den Sollwerten der durch

die Wellenmaschine erzeugten Wellen der übrigen WA-Versuche, die nur mit der FFT untersucht wurden, konnte ebenfalls bestätigt werden.

Für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche zeigte die Fourier Analyse, dass die Anzahl der höherharmonischen Komponenten im Messsignal im Vergleich zum WA-Fall geringer war. Die daraus abzuleitende Abnahme der Nichtlinearität zeigte auch die Untersuchung der Hilbert-Spektren der WCI-Signale. Der Grad der Nichtlinearität wurde in den Hilbert-Spektren als Mittelwert über den Zeitraum zwischen 400 s und 700 s berechnet. Der Verlauf des Signals im Hilbert-Spektrum zeigte jedoch, dass die Nichtlinearität des Signals über die gesamte Versuchsdauer schwankte. Demnach ist es im Vergleich zur FFT mit der HHT möglich, die Nichtlinearität in Abhängigkeit der Zeit zu ermitteln. Bezüglich der Frequenzen zeigte sich auch für die mit beiden Methoden untersuchten WCI-Fälle, dass die Frequenz der Welle keine Änderung infolge der Strömung erfuhr. Dies galt ebenso für die übrigen, nur mit der FFT analysierten Versuche.

Die Amplitudenspektren der FFT zeigten des Weiteren, dass im WCI-Fall Seitenbänder in der unmittelbaren Umgebung der Peaks auftraten. Die Ausprägung der Seitenbänder nahm mit Anstieg des Strömungsdurchflusses und mit der Abnahme der Wellenperiode zu. Dieser durch die Strömung verursachte Effekt konnte mit der HHT nicht identifiziert werden.

Im Rahmen der HHT konnte sowohl für den Wellenversuch (WA) als auch für die kombinierten Wellen-Strömungs-Versuche (WSI) festgestellt werden, dass neben einer das Eingangssignal gut reproduzierenden IMF zwei weitere IMFs existierten, die ebenfalls Anteile des Messsignals enthielten. Eine Zuordnung der ersten Komponente war nicht möglich und bedarf weiterer Untersuchungen, da möglicherweise ein *mode mixing* vorlag. Die zweite Komponente besaß zwar eine Frequenz des gleichen Frequenzbereichs wie das Messsignal, zeigte allerdings für alle betrachteten WCI-Versuche einen von der Wellenfrequenz abweichenden, geringeren Mittelwert und einen größeren Schwankungsbereich der Frequenzen. Die Grade der Nichtlinearität dieser Komponente zeigen mit Werten zwischen 0,42 und 0,60, dass sich die Nichtlinearität der Komponente deutlich von derjenigen der Eingangssignale unterschied. Die Identifizierung dieser sowohl im Wellensignal als auch im WCI-Signal zusätzlich vorhandenen Komponenten war das Ergebnis der Hilbert-Huang-Analyse. Die Amplitudenspektren der FFT wiesen keine zusätzlichen Komponenten anderer Basisfrequenzen auf.

Die Fourier-Transformation erwies sich als geeignete Analyseverfahren, um einen Überblick über grundsätzliche Eigenschaften des untersuchten Signals zu erhalten. Die durchgeführten Analysen vermittelten zum einen die Frequenz der Basiskomponente, welche der Frequenz der Welle entspricht, und zum anderen die Anzahl und die Amplitude der höherharmonischen Komponenten einen ersten Eindruck über die gemessene Welle. Die Identifizierung möglicher Effekte der Wellen-Strömungs-Interaktion durch diese grundsätzlichen Parameter, d. h. auf Grundlage der ermittelten Wellenperiode und Nichtlinearität bzw. Wellenform, konnte über den Vergleich der jeweiligen Spektren eines WA-Falls und eines entsprechenden WCI-Falls geschehen.

Bei der HHT erfolgt die Beurteilung der auftretenden Wellen-Strömungs-Prozesse über den Vergleich der Charakteristik der IMFs, die das Eingangssignal wiedergeben, und deren Hilbert-Spektren. Wie auch bei der FFT konnten die Ergebnisse bezüglich der Wellenperiode und der Linearität des Signals verglichen werden. Zudem bot die HHT eine

Möglichkeit der Identifizierung und der zeitlichen Zuordnung verschiedener, auch instationärer Prozesse zu den Messergebnissen.

Die Auswertung der Messdaten mit der HHT hat jedoch auch gezeigt, dass die Methode für die Analyse der betrachteten Wellen-Strömungs-Daten noch nicht optimiert ist. Die durchgeführte Parameterstudie hat deutlich gemacht, dass durch nicht optimal gewählte Einstellungsparameter für die Zerlegung des Signals in seine Oszillationsmodi beispielsweise ein *mode mixing* auftritt. Das *mode mixing* führt zu einer mathematisch bedingten Aufspaltung oder Vermischung von gleichen Frequenzgrößenordnungen in unterschiedlichen IMFs. Die Qualität der Ergebnisse aus der HHT hängt folglich sehr von den zuvor gewählten Einstellungen ab.

Die Interpretation der mittels der HHT erhaltenen Ergebnisse erfolgte unter der Annahme, dass für die durchgeführten Analysen geeignete Einstellungsparameter gewählt wurden. Dennoch kann nicht uneingeschränkt davon ausgegangen werden, dass die Analyseergebnisse tatsächlich ausschließlich physikalische Vorgänge widerspiegeln. Dies gilt beispielsweise für die identifizierte zusätzliche Komponente in den WA- und WCI-Versuchen. Für diese wird zwar aufgrund der festgestellten Charakteristiken ein physikalischer Ursprung vermutet, allerdings kann ein mathematischer Grund für das Erscheinen dieser Komponente ohne tiefere Analysen nicht sicher ausgeschlossen werden. Gleiches gilt für die weitere Komponente, deren Deutung im Rahmen des Projektes nicht möglich war und für deren Ursache ein *mode mixing* vermutet wird.

Demnach besteht für die Anwendung der Hilbert-Huang-Analyse weiterer grundlegender Analysebedarf, um die Methode für die Untersuchung der Wellen-Strömungs-Daten zu optimieren. Im Gegensatz hierzu ist die Fourier-Transformation eine Methode, die auch im Bereich der Wellenversuche auf eine langjährige Erfahrung zurückblicken kann und folglich als erprobt und ausgereift anzusehen ist. Daher sollte auch bei zukünftigen Untersuchungsreihen stets zusätzlich eine reine Frequenzanalyse der Versuchsergebnisse erfolgen, da die Frequenzanalyse zur Überprüfung der Ergebnisse aus der HHT und damit zur Validierung der Zeit-Frequenzanalyse-Methode herangezogen werden kann.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Als Voraussetzung zur Durchführung der physikalischen Modellversuche zur schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion im Küstennahbereich wurde ein 3D-Wellenbecken um notwendige technische Erweiterungen zur Strömungsgenerierung und Wellenabsorption erweitert. Diese Maßnahmen waren ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens und konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Nach Fertigstellung der erweiterten Versuchseinrichtung wurden physikalische Modellversuche zur schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion durchgeführt. Es wurde zunächst die Entstehung von hydrodynamischen Belastungen aufgrund der schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion im Küstennahbereich untersucht. Die physikalischen Modellversuche beinhalteten folgende Untersuchungen:

1. Strömungsversuche ohne Wellen, um die ungestörten Strömungsverhältnisse zu erfassen
2. Wellenversuche ohne Strömung, um die ungestörten Wellenverhältnisse zu erfassen
3. Wellen-Strömungs-Versuche, um das Wellen-Strömungs-Verhalten zu erfassen

Durch diese Vorgehensweise konnten Aussagen über die stattfindenden Prozesse im 3D-Wellen-Strömungsbecken getroffen und Randeinflüsse der Versuchseinrichtung ermittelt werden. Der Reflexionskoeffizient  $k_r$  der passiven Wellenabsorber wurde in Abhängigkeit der Wellenhöhe, der Wellenperiode und der Richtung bestimmt und variierte zwischen 2 % und 13 %.

Die Ziele der Strömungsversuche ohne Wellen waren die technische Umsetzung von Strömungsmessungen im Wellenbecken, Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Wassertiefen und die Ermittlung der Strömungscharakteristik. Diese Ziele konnten mit einem hohen Detailgrad erreicht werden, so dass sehr gute Kenntnisse bzgl. der Strömungsgenerierung der erweiterten Versuchseinrichtung bestehen. Es konnte gezeigt werden, dass im Zentrum des 3D-Wellen-Strömungsbeckens auf einer Fläche von ca. 10 m x 10 m räumlich homogene Strömungsfelder erzeugt werden können und dass diese Strömungen mit Seegang aus verschiedenen Richtungen überlagert werden können. Randeinflüsse aufgrund einer jet-artigen Strömungsgenerierung, wie in MacIver et al. (2006) beschrieben, konnten vermieden werden.

Im Anschluss an die Strömungsversuche wurden die physikalischen Modellversuche zur Wellengenerierung und dem Wellenverhalten ohne Strömung durchgeführt. Die Ziele der Versuche waren zum einen das Verhalten von unidirektionalen, regelmäßigen Wellen mit der neuen passiven Wellenabsorption im Wellenbecken zu ermitteln und zum anderen die Wellencharakteristik der Wellendaten als Grundlage für die folgenden Untersuchungen zur Wellen-Strömungs-Interaktion zu erhalten. Diese Ziele konnten ebenfalls erreicht werden, so dass auch in diesem Fall sehr gute Kenntnisse bzgl. der Wellengenerierung in der erweiterten Versuchseinrichtung bestehen. In Abhängigkeit der Wellenrichtung wurden Soll-Wellenperioden mit einer maximalen Abweichung von 0.4 % reproduziert, Soll-Wellenhöhen zeigten zu Beginn Abweichungen von bis zu 20 %. Für diese Abweichungen wurden im Rahmen des Projektes Korrekturfunktionen ermittelt.

Im letzten Schritt der physikalischen Modellversuche wurden die Wellen-Strömungsversuche durchgeführt, mit dem Ziel, die Wellencharakteristik bei schräger und orthogonaler Wellenrichtung zur Strömungsrichtung bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zu untersuchen. Dieses Ziel konnte ebenfalls erfolgreich erreicht werden und zeigt interessante Änderungen der Wellencharakteristik. Im Einzelnen konnte gezeigt werden:

- Die von Brevik und Bjørn (1979), Swan und James (1998) sowie MacIver et al. (2006) aufgezeigten Transformationsprozesse während der Wellen-Strömungs-Interaktion (Korrelation der Strömungsmagnitudo und der Wellensteilheit, Anstieg der Wellensteilheit mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung) konnten reproduziert werden.
- Die Nichtlinearität von Wellen nimmt bei der Interaktion mit Strömungen zu, allerdings sind die Amplituden 4. und 5. Ordnung sehr klein ( $< 0.1\%$ ) und deren Einfluss auf die Wellenform demnach gering.
- Die Basisfrequenz einer generierten regelmäßigen Welle wurde durch die Überlagerung mit einer Strömung nicht verändert.
- Die Amplitude höher-harmonischer Frequenzen im Amplitudenspektrum sinkt unter Strömungseinfluss im Vergleich zur Wellenausbreitung ohne Strömungskomponente.



- Die Wellen-Strömungs-Interaktion führt sowohl für die Peak-Frequenz als auch für höher-harmonischen Frequenzen zur Ausbildung von Seitenbändern im Amplitudenspektrum (Hinweis von Modulationsinstabilitäten). Die Amplitude der Frequenzkomponenten der Seitenbänder steigt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit an.
- Die Ausprägung der Seitenbänder nimmt für kleiner werdender Wellenperioden zu.
- Ein Vergleich der vierten IMF zwischen Wellenversuchen mit und ohne Strömungsinteraktion ermöglicht, Auswirkungen der Wellen-Strömungs-Interaktion zu identifizieren.
- Die Nichtlinearität von Wellen mit steigendem Einfluss von Strömungskomponenten wurde quantifiziert. Der Grad der Nichtlinearität der IMF c4 nimmt hierbei ab und der Grad der Nichtlinearität der IMF c5 für steigende Strömungsgeschwindigkeiten zu.

Die Anwendung der Hilbert-Huang-Analyse auf die hier untersuchten Versuche hat es ermöglicht, die Eingangssignale des Wellenversuchs und der Wellen-Strömungs-Versuche als schmalbandige Signale in einer IMF wiederzugeben. Durch die Darstellung der IMFs in den Hilbert-Spektren war es möglich, Unterschiede zwischen dem WA-Fall und dem WCI-Fall festzustellen: Für einen Vergleich konnten im Rahmen dieser Untersuchung (i) der Kurvenverlauf der IMFs im Hilbert-Spektrum, (ii) die Schwankungsbreite der dargestellten Frequenzen sowie deren Mittelwert und (iii) der Grad der Nichtlinearität, der aus den Momentanfrequenzen der IMF berechnet wird, herangezogen werden.

Ein Vorteil gegenüber der Anwendung der Fourier-Analyse war die Möglichkeit der zeitlichen Zuordnung verschiedener Prozesse. Beispielsweise konnte für den Wellenversuch festgestellt werden, dass die Schwankungsbreite des im Hilbert-Spektrum dargestellten Signals und somit die Nichtlinearität im Versuchsverlauf variiert.

## 5.1 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die vorliegenden Daten bieten die Grundlage für weitere wissenschaftliche Qualifizierungsprojekte (z. B. Promotionsarbeiten). Des Weiteren ist die im Rahmen des Forschungsvorhabens für die Untersuchung der Wellen-Strömungs-Interaktion erweiterte Versuchseinrichtung für generelle Fragestellungen zur funktionalen Optimierung von Küstenschutzbauwerken direkt nutzbar. Grundsätzlich schließen sich, aufbauend auf den in dieser Studie gewonnenen Erkenntnissen, unmittelbare Folgeuntersuchungen zur Analyse unterschiedlicher Fragestellungen an, so z. B. Analysen zu wellen- und strömungsinduzierten Belastungen auf Küsten- und Offshore-Bauwerke mit Fokus auf den Grenzbereich zwischen Boden und Bauwerk, die Untersuchung komplexer Struktursysteme für Bauwerksgründungen und die Auslegung schwimmender Strukturen und Plattformen. Entsprechende Untersuchungen hierzu in entsprechenden Anschlussprojekten werden bereits durchgeführt.

Beispielsweise wird mit dem BMWi (AIF) geförderten Projekt „TexBase“ die Kolkbildung für überlagerte Wellen- und Strömungseinwirkung untersucht, um Grundlagen für die erforderlichen technischen und wissenschaftlichen Planungen und Bemessungen für das innovative OWEA-Schwergewichtsfundament mit aufgelöster Struktur zu schaffen. Darüber hinaus wurden auch Studien zu konventionellen Strukturen bereits im Wellenbecken durchgeführt, die allerdings mit bislang in Versuchseinrichtungen kaum produzierbaren Randbedingungen getestet wurden. Daher konnten mit Hilfe der Strömungs- und

Wellenüberlagerung bereits auch die Kolkgenese und die komplexere Lastcharakteristik am Monopile untersucht werden (BMU Förderung).

Da die hier vorgestellten Untersuchungen zunächst auf vergleichsweise kleinskaligen Modellversuchen basieren, wären im Anschluss an dieses Forschungsvorhaben erweiterte Studien unabdingbar. Die Studien würden sowohl Modellversuche im großen Maßstab unter verminderten Maßstabeffekten, wie auch Messungen an realen Bauwerken im Rahmen eines Monitoringkonzepts zur Korrelation mit den vorhandenen Messergebnissen, einbeziehen. Im Bereich der Grundlagenforschung gibt es weitere interessante wissenschaftliche Fragestellungen zu den Prozessen der schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion bei turbulenten Strömungen. Der Fokus bei den durchgeführten Untersuchungen lag auf der Beeinflussung der Wellen durch die Strömung. Künftige wissenschaftliche Fragestellungen können als Schwerpunkt die Untersuchung des Einflusses der Wellen auf die turbulente Strömung haben, so dass aus den vorliegenden Ergebnissen und den künftigen Ergebnissen sich weitere Erkenntnisse zu der schrägen und orthogonalen Wellen-Strömungs-Interaktion ergeben.

## 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Beteiligten, die im Rahmen von Vorversuchen, der Antragsstellung, der Realisierung, Versuchsdurchführung und Auswertung zum Gelingen des Projektes beigetragen haben: Christina Carstensen, Lutz Evers, Arndt Hildebrandt, Stefan Mehlhase, Arne Stahlmann, Gerhard Streich, Jonathan Weisheit und Mayumi Wilms.

## 7 Literaturverzeichnis

Baldenhofer, K.; Marschall, N.: Lexikon der Fernerkundung. Stand: 19.04.2015: <http://www.fe-lexikon.info/lexikon-d.htm>, 2015.

Brevik, I.: Flume experiment on waves and currents II. Smooth bed. In: Coastal Engineering 4, 89–110. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(80\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90009-5), 1980.

Brevik, I.; Bjørn, A.: Flume experiment on waves and currents. I. Rippled bed. In: Coastal Engineering 3, 149–177, [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(79\)90019-X](https://doi.org/10.1016/0378-3839(79)90019-X), 1979.

Brühl, M.: Direct and inverse nonlinear Fourier transform based on the Korteweg-deVries equation (KdV-NLFT). A spectral analysis of nonlinear surface waves in shallow water. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2014.

Dalrymple, R. A.; Dean, R. G.: Waves of maximum height of uniform currents. In: Journal of the waterways harbors and coastal engineering division, Aug. 1975.

Dick, S.; Mittelstaedt, E.; Müller-Navarra, S. H.: Der küstennahe Gezeitenstrom in der Deutschen Bucht. 4. unveränd. Aufl. Hamburg: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2348), 2010.

Faraci, C.; Foti, E.; Musumeci, R. E.: Waves plus currents at a right angle: The rippled bed case. In: J. Geophys. Res., 113, C7, <https://doi.org/10.1029/2007JC004468>, 2008.

Fredsø, J.; Andersen, K. H.; Sumer, B. M.: Wave plus current over a ripple-covered bed. In: *Coastal Engineering* 1999, 38, 177–221, 1999.

Groenweg, J.; Klopman, G.: Changes of the mean velocity profiles in the combined wave–current motion described in a GLM formulation. In: *J. Fluid Mech.*, 370, 271–296, <https://doi.org/10.1017/S0022112098002018>, 1998.

Groenweg, J.; Battjes, J.: Three-dimensional wave effects on a steady current. In: *J. Fluid Mech.*, 478, <https://doi.org/10.1017/S0022112002003476>, 2003.

Herchenroder, B. E.: Effects of currents on waves. Fort Belvoir, Va.: USA Army. Coastal Engineering Research Center (Coastal engineering technical aid, 81,14), 1981.

Huang, N. E.; Lo, Men-Tzung; Wu, Z.; Chen, X-Y.: Method for quantifying and modeling degree of nonlinearity, combined nonlinearity, and nonstationarity. In: Publication, U.S.P.A., Pub. No.: US 2013/0080378 A1 Pub. Date Mar. 28, 2013, 44, 2013.

Huang, N. E.; Shen, Z.; Long, S. R.; Wu, M. C.; Shih, H. H.; Zheng, Q.: The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In: *Proceedings of Royal Society London*, 454, 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>, 1998.

Jonsson, I. G.: Wave-Current Interactions. In: LeMéhauté, Bernard; Hanes, Daniel M.; Hill, Maurice Neville; Robinson, Allan R. (Hg.): *The sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas*. New York, NY: Interscience Publ., 1990.

Jonsson, I. G.; Christoffersen, J. B.: Current Depth Refraction of Regular Waves. In: Edge, B. L. (Hg.): *Nineteenth Coastal Engineering Conference. Proceedings of the international conference; September 3–7, 1984, Houston Texas*. New York, NY: American Soc. of Civil Engineers, 1984.

Jonsson, I. G.; Skovgaard, O.: Wave refraction across a shearing current. Lyngby: Technical Univ. of Denmark (Report/The Danish Center for Applied Mathematics and Mechanics, DCAMM, 151), 1978.

Kemp, P. H.; Simons, R. R.: The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating with the current. In: *J. Fluid Mech.*, 116 (-1), 227–250. <https://doi.org/10.1017/S0022112082000445>, 1982.

Kemp, P. H.; Simons, R. R.: The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating against the current. In: *J. Fluid Mech.*, 130 (-1), 73–89. <https://doi.org/10.1017/S0022112083000981>, 1983.

Kronawitter, A.: Sonnensystem, Stand 20.04.2015: <http://astronomy.meta.org/infosys/ELisa/Lern/AstroEin/sonnenSysAENF.html>, 2002.

Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKE) (Hg.): *Die Küste*, 65, 2015. EAK Korrigierte Ausgabe 2007, unveränderter Nachdruck 2015.

Lieske, M.; Schlurmann, T.; Carstensen, C.; Evers, L.; Kerpen, N. B.; Mehlhase, S.; Stahlmann, A.; Weisheit, J.: Seegangsbelastungen (SEELE): Prozesse der Hydro-, Sedi-ment- und Morphodynamik bei Interaktion von Richtungsseegang mit Strömung,

Abschlussbericht Nr. 754. Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, <https://doi.org/10.2314/GBV:1017922675>, 2017.

MacIver, R. D.; Simons, R. R.; Thomas, G. P.: Gravity waves interacting with a narrow jet-like current. In: *J. Geophys. Res.* 111 (C3), <https://doi.org/10.1029/2005JC003030>, 2006.

Mai, S.: Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste. Hg. v. Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen. Stand 20.03.2017 [https://www.lufi.uni-hannover.de/seegangsatlas\\_reg\\_ver/start.htm](https://www.lufi.uni-hannover.de/seegangsatlas_reg_ver/start.htm), 2004.

Musumeci, R. E.; Cavallaro, L.; Foti, E.; Scandura, P.; Blondeaux, P.: Waves plus currents crossing at a right angle: Experimental investigation. In: *J. Geophys. Res.* 111 (C7), <https://doi.org/10.1029/2005JC002933>, 2006.

Peregrine, D. Howell: Interaction of Water Waves and Currents. In: von Mises, Richard; Dryden, H. L.; Chernyi, G. G. (Hg.): *Advances in applied mechanics*, Vol. 16. 1. Aufl. Elsevier textbooks, 1976.

Peregrine, D. H.; Jonsson, I. G.: Interaction of waves and currents. Fort Belvoir, Va. In: *Coastal Engineering Res. Center (USA, Army, Coastal Engineering Research Center. Miscellaneous report*, 83(6), 1983.

Swan, C.; James, R. L.: *Random Waves on a Vertically-sheared Current*. Virginia: American Society of Civil Engineers, 1998.

Taylor, G. I.: The Spectrum of Turbulence. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 164, 919, 476–490. <https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032>, 1938.

Thomas, G. P.: Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 1. Linear waves. In: *J. Fluid Mech.* 110, 457–474. <https://doi.org/10.1017/S0022112081000839>, 1981.

Thomas, G. P.: Wave-current interactions: an experimental and numerical study. Part 2. Non-linear waves. In: *J. Fluid Mech.* 216, 505–536. <https://doi.org/10.1017/S0022112090000519>, 1990.

Toffoli, A.; Ardhuin, F.; Babanin, A. V.; Benoit, M.; Bitner-Gregersen, E. M.; Cavaleri, L.: Extreme Waves in Directional Wave Fields Traversing Uniform Currents. In: *Proceedings of the HYDRALAB III Joint User Meeting*, Hannover, February 2010.

Toffoli, A.; Bitner-Gregersen, E. M.; Osborne, A. R.; Serio, M.; Monbaliu, J.; Onorato, M.: Extreme waves in random crossing seas: Laboratory experiments and numerical simulations. In: *Geophys. Res. Lett.* 38, 6, <https://doi.org/10.1029/2011GL046827>, 2011.

Whitham, G. B.: *Linear and Nonlinear Waves*. New York: John Wiley & Sons, 1974.