

- 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 (KFKI) (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, 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.