

Untersuchung von Designparametern für Offshore-Windenergieanlagen mit großmaßstäblichen physikalischen Versuchen

Finanzierung/Auftraggeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Forschungsprojekt: GIGAWIND *alpha ventus*, Teilprojekte 1 und 5
Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. T. Schlurmann
Bearbeitung: Dipl.-Ing. A. Hildebrandt, Dipl.-Ing. A. Stahlmann
Förderungszeitraum: 03/2008 – 10/2011

Einleitung und Forschungshintergrund

Durch die Errichtung des ersten deutschen Offshore-Windparks *alpha ventus* 45 km nördlich der Insel Borkum erfolgte ab Sommer 2009 der Startschuss für den Ausbau der Offshore-Windenergie in Deutschland im Rahmen der von der Bundesregierung geplanten Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien bei der deutschen Stromerzeugung. Das Testfeld mit insgesamt zwölf Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) mit einer Leistung von jeweils 5 MW stellt durch die Errichtung in einer Wassertiefe von rund 30 m den ersten deutschen Windpark dar, der unter echten Offshore-Bedingungen errichtet wurde und betrieben wird. Zur Testfeldforschung und damit verbundener Optimierung zukünftiger Anlagen wurden einzelne der installierten OWEA sowie Bereiche des Testfeldes selbst mit umfangreicher Messtechnik und -sensorik ausgestattet, wodurch die an der Forschungsinitiative *Research at Alpha Ventus* (RAVE) beteiligten und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungspartner und -projekte mit detaillierten Messdaten aus dem Testfeld versorgt werden.

Forschungsprojekt GIGAWIND alpha ventus

Eines dieser Forschungsprojekte stellt das an der Leibniz Universität Hannover (LUH) in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) 2008 gestartete interdisziplinäre Verbundprojekt GIGAWIND *alpha ventus* mit insgesamt acht Teilprojekten dar. Gesamtziel des Projektes ist die Erstellung eines ganzheitlichen Dimensionierungskonzeptes für OWEA-Tragstrukturen anhand von Messungen im Testfeld mit dem Schwerpunkt der Kostenminimierung und Effizienzsteigerung sowie einer Optimierung des Entwurfsprozesses beim zukünftigen Bau der Anlagen.

Lastmodelle für Wind- und Seeganglasten

Im Rahmen des Teilprojektes 1 wird ein Vergleich zwischen den Naturmessungen und den gängigen Berechnungsverfahren angestellt, die sowohl auf linearen als auch auf nichtlinearen Ansätzen basieren. Nicht-brechende Wellenlasten auf Strukturelemente einer OWEA werden im Allgemeinen mit der weit verbreiteten Morison-Gleichung bestimmt, die empirisch ermittelte Lastkoeffizienten für den Trägheits- und Zähigkeitsterm impliziert (C_D , C_M). Für brechende Wellen werden unter anderem Ansätze nach Goda oder Wienke verwendet, sowie die Morison-Gleichung mit dem „Slamming“ Koeffizienten (C_S). Die Übertragung bestehender Lastansätze, die vielfach auf Erkenntnissen aus Wellenkanälen beruhen, auf die Bedingungen in der Natur ist jedoch aufgrund der dreidimensionalen Struktur des natürlichen

Seegangs nur bedingt möglich, so dass die einwirkenden Lasten zumeist überschätzt werden. Mit Hilfe der im Testfeld speziell an der Tripod- und Jacketstruktur gewonnenen Messdaten sollen die bestehenden Lastmodelle validiert und für die Strukturen optimiert werden. Die Ergebnisse werden in einem später erfolgenden Schritt in ein modular aufgebautes Bemessungspaket (Teilprojekt 8) implementiert, das die Bemessung von OWEA unter serienproduktionstechnischen Gesichtspunkten als Zielsetzung hat.

Weiterhin werden für die Kombination von Wind- und Seegangslasten Ansätze zur Ermittlung und Kombination beider Lasten mit dem Schwerpunkt der Berücksichtigung der Korrelation weiterentwickelt. Die hoch aufgelöste Wind- und Seegangsmessung bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Lasteinwirkung bietet die Möglichkeit der Validierung und Verbesserung bestehender Modelle.

Untersuchung und Optimierung der Wellenlastmodelle

Die im vorausgehenden Abschnitt beschriebenen Vorhaben bezüglich der optimierten Lastmodelle werden anhand von Naturmessungen im Testfeld alpha ventus und mit skalierten physikalischen Modellversuchen sowie hydronumerischen Simulationen erarbeitet, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Im Rahmen von RAVE werden an dem mit Mess-Sensorik bestückten Tripod M7, der von der Firma AREVA-Multibrid errichtet und im Testfeld installiert wurde, unter anderem Strömungs-, Wind-, Wellen- und Wasserdruckmessungen vorgenommen, um die Belastungen der Struktur zu erfassen. Weiterhin wird mit Dehnungsmessstreifen und Beschleunigungssensoren die Reaktion der Struktur auf die Belastungen aufgezeichnet. Die Messdosen für die Wasserdruckerfassung wurden innerhalb des Projektes im Juli 2008 vom Franzius-Institut installiert (Abbildung 1).

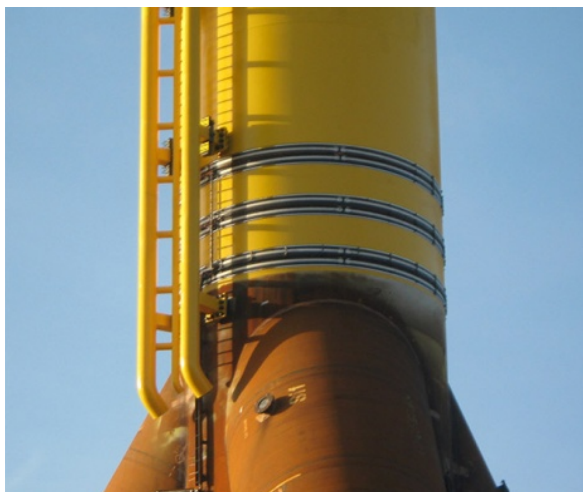


Abbildung 1: Drei Messmanschetten am Tripod M7



Abbildung 2: Wellenbrechen am Zylinder im WKS

Sie erfassen zum einen die Wasserstände entlang des Zylinderumfangs und geben zum anderen Aufschluss über starke lokale Druckänderungen, wie sie im Bereich von Ablösestellen auftreten. Entlang des Zentralrohrumfangs und entlang der Zylinderspanne wurden 32 Druckmessdosen an 3 horizontal verlaufenden Gummimanschetten als Vertikal- und Horizontalprofil um das Zentralrohr des Zylinders fixiert. Eine detaillierte Beschreibung der Sensoranordnung ist Hildebrandt et al. (2009) zu entnehmen.

Die zu erwartenden Naturdaten bezüglich der Wind- und Wellenlasten werden durch gezielte Modellversuche ergänzt, um die in der Natur überlagert auftretenden Einflussgrößen im Modell unter idealisierten, aber kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Neben derzeitigen Modellversuchen am Zylinder im Schneiderbergkanal des Franzius-Instituts (Abbildung 2) sind weiterführende großmaßstäbliche Versuche am Tripod im Großen Wellenkanal (GWK) mit Seegangslasten durch brechende und nicht-brechende Wellen für Anfang 2010 geplant. Neben den Messungen zu den Seegangslasten werden ebenfalls Versuche mit Gummimanschetten durchgeführt, um den Einfluss der Halterung auf die Messsignale abzuschätzen.

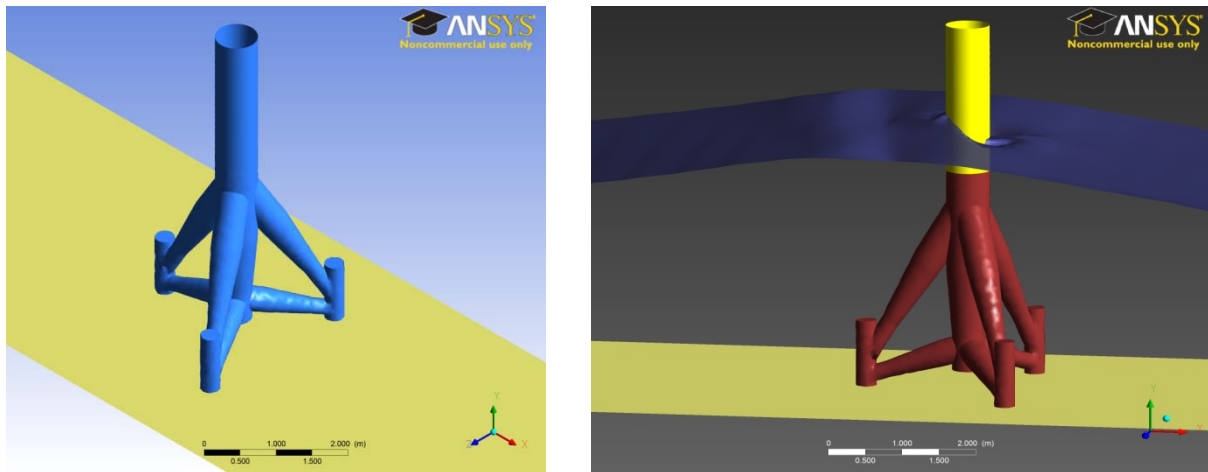


Abbildung 3: Tripod im Maßstab 1:12 im numerischen Modell zur Modellierung der Wellenlasten

Mit Hilfe der Versuche und Naturmessdaten werden CFD Modelle kalibriert, die kombiniert mit den Labor- und Testfelderergebnissen als hybrides Modell zur Weiterentwicklung der Berechnungsansätze dienen. Insbesondere mit den CFD Modellen lassen sich lokale Lastwirkungen für Detailuntersuchungen an der Tragstruktur untersuchen (Abbildung 3), um beispielsweise das Beulverhalten spezieller Bauteile oder den Spannungsverlauf in Knotenpunkten zu ermitteln. Dazu muss die Verteilung des dynamischen Drucks über den Umfang und die Höhe der Struktur bestimmt werden, um möglichst genaue lokale Strukturmodelle erstellen zu können. Dies wird insbesondere auch für steile und brechende Wellen mit Berücksichtigung des Wellenaufbaus an der Tragstruktur untersucht. Letzteres ist beispielsweise für die Dimensionierung einer Zugangsplattform oder generell für auskragende Bauteile an der Anlage von entscheidender Bedeutung.

Untersuchung der Kolkphänomene an OWEA

Es gilt als hinreichend bekannt, dass es an Gründungsstrukturen von Offshore-Bauwerken zu einer Ausbildung von mehr oder minder ausgeprägten Kolken infolge von lokalen Strömungsphänomenen kommen kann. Hervorgerufen werden diese Änderungen im natürlichen Strömungsregime im Bereich des Meeresbodens an und im nahen Umfeld einer Struktur aus der hochkomplexen Interaktion zwischen dem Seegang, der tide- oder welleninduzierten Strömung, dem Meeresboden und der Struktur selbst. Durch die noch unzureichenden Kenntnisse über die genaue zeitliche und räumliche Entwicklung von Kolken um und an komplexen OWEA-Gründungsstrukturen erfolgt ihre Dimensionierung derzeit mit erhöhten Sicherheitsfaktoren und damit erhöhten Kosten. Ein Ziel der Untersuchungen innerhalb des Teilprojektes 5 ist es daher, vertiefte Erkenntnisse über die Kolkentwicklung um die Grün-

ungsstrukturen zu erlangen und die Vorhersagemöglichkeiten zu verbessern, um zukünftig effizientere Gründungsabmessungen zu erzielen, die gegebenenfalls in Kombination mit entsprechenden Kolk sicherungsmaßnahmen einhergehen.

Das Untersuchungsprogramm sieht dabei die Auswertung von Naturmessdaten zur Kolkentwicklung an den Anlagen im Testfeld (mittels Echolot-Peilungen, durchgeführt vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH), physikalische Modellversuche im Maßstab 1:40 und 1:12 im Wellenkanal des Franzius-Instituts (WKS) bzw. im Großen Wellenkanal (GWK) sowie numerische Untersuchungen durch ein Simulationsmodell zur Kolkentwicklung unter Wellen- und Strömungsbelastung an der Anlage vor, das im Rahmen dieses Teilprojektes weiterentwickelt werden soll. Der Schwerpunkt der Untersuchungen im Teilprojekt liegt dabei auf den sechs der zwölf im Testfeld installierten Tripod-Gründungsstrukturen der Fa. AREVA-Multibrid. Aufgrund der komplexen geometrischen Struktur dieses Gründungstyps können hier bisherige empirische Berechnungsansätze zur Kolkentwicklung, die in der Vergangenheit größtenteils für Monopiles oder Pfahlgruppen (vgl. Jacket-Plattform) entwickelt wurden, nur sehr bedingt angesetzt werden und allenfalls für erste, sehr vereinfachende Abschätzungen herangezogen werden.

Physikalische Modellversuche im Wellenkanal WKS

In den kleinskaligen Modellversuchen im Maßstab 1:40 werden Untersuchungen zu Kolkungsvorgängen und Strömungsbildern am Modell-Tripod im Wellenkanal WKS im Maßstab 1:40 durchgeführt. Diese Laborversuche dienen, neben der Gewinnung von Messdaten zur späteren Kalibrierung des numerischen Modells, ebenfalls zur Gewinnung signifikanter Eingangsparameter zur Sensitivitätsanalyse für die darauf aufbauenden Modellversuche im GWK im großskaligen Maßstab.

Für die Untersuchungen wurde in den Wellenkanal eine bewegliche Sohle (Feinsand, $d_{50} = 0,15$ mm) von zunächst $5,5$ m² Grundfläche und $0,4$ m Tiefe mit entsprechenden Anrampungen eingebaut, die im Laufe der Untersuchungen auf 11 m² Grundfläche und $0,25$ m Tiefe verändert wurde. Im Bereich des Sandbetts können die zu untersuchenden Strukturen über eine feste Verbindung mit der Kanalsohle eingebaut werden (Abbildung 4). Es wurden zahlreiche Versuche zur Kolkbildung unter Wellen mit verschiedenen Konfigurationen von Wassertiefen d (60 - 75 cm), Wellenhöhen H und H_S (10 - 25 cm) und Wellenperioden T und T_P ($1,0$ - $3,0$ s) für regelmäßige Wellen und Wellenspektren (Jonswap) durchgeführt und analysiert. Die Kolkentwicklungen für die jeweiligen Versuchsserien wurden jeweils nach einer definierten Wellenanzahl mithilfe eines unter Wasser arbeitenden Laser-Distanzmessers aufgemessen. Die Positionierung des Lasers erfolgt über eine programmierbare Messbühne, mit der das Messinstrument in drei Achsen automatisiert verfahren werden kann und so kontinuierlich über der Sohle bewegt Bodenprofile aufnimmt, ohne jeweils den Kanal zu leeren und dadurch gegebenenfalls das entstandene Kolkbild an der Struktur zu stören. Aus den Daten werden im Post-Processing flächenhafte Tiefendarstellungen erzeugt (Abbildung 5). Auf eine ähnliche Weise wurden mittels der Messbühne Strömungsprofile um die Struktur durch eine ADV-Sonde aufgenommen. Diese punktuellen Messungen werden im Laufe des Jahres durch detaillierte nicht-invasive, flächenhafte Messungen ergänzt, die mithilfe eines neuen ab Sommer 2010 am Franzius-Institut vorhandenen PIV-Messsystems (Particle Image Velocimetry) erstellt werden.

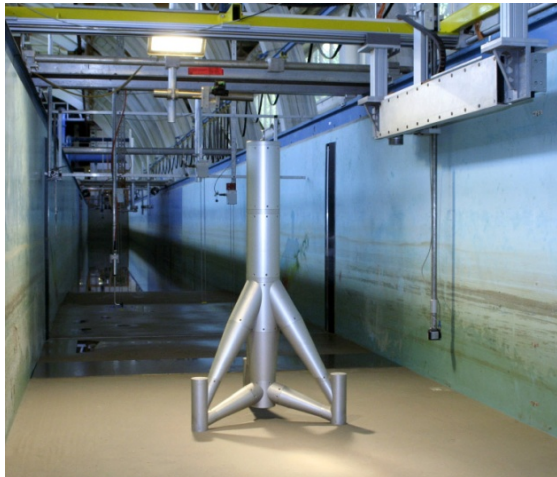


Abbildung 4: Modellaufbau im Wellenkanal WKS zur Kolkuntersuchung im Maßstab 1:40

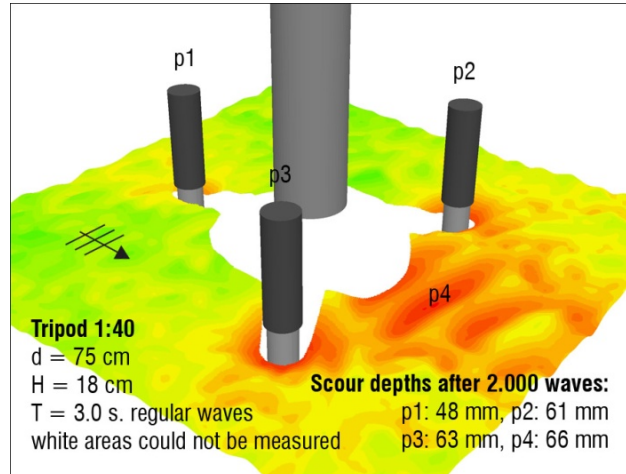


Abbildung 5: Plot gemessener Kolkiefen eines Versuchs nach 2.000 Wellenzügen im Wellenkanal WKS

Modellversuche im Großen Wellenkanal GWK

In Kombination mit den Untersuchungen zu Seegangs-/Wellenlasten brechender Wellen auf OWEA Strukturen und Kolkenschutzmaßnahmen werden ab Frühjahr 2010 physikalische Modellversuche im GWK im Maßstab 1:12 zur detaillierten Untersuchung der Kolkungsvorgänge durchgeführt. Als Modellsediment für die Kolkuntersuchungen dient der Modellsand aus den bisherigen Versuchen im WKS, der in einer Schichtdicke von 1,2 m als Profil mit entsprechender Anrampung in den GWK eingebaut wird.

Zur Aufnahme der Kolkiefen bei den Versuchen mit regelmäßigen Wellen und Wellenspektren kommt neben einzelnen Punkt-Echoloten ein Fächer-Echolot-System zum Einsatz. Zur Sichtkontrolle bzw. Aufnahme der Kolkiefen direkt an den Pfählen des Tripods dienen wasserdichte Kameras im Inneren der Struktur, über die mithilfe von Plexiglas-Sichtfenstern die anliegenden Sedimenthöhen aufgenommen werden können. Rückschlüsse auf die Porenwasserdrücke im Sediment im Bereich der Kolke können über eingebaute Druckmessdosen im Sand gezogen werden. Während der Versuche werden die Strömungen um die Struktur ähnlich der Punktmessungen im WKS mit Flügel-Messsonden und ADV-Sonden aufgenommen, wobei letztere in einem Vertikalprofil an der Messbühne befestigt werden und so während der Versuche an verschiedene definierte Positionen verfahren werden können.

Zusammenfassung

Für die Serienproduktion von OWEA werden im Rahmen des Forschungsprojekts Gigawind alpha ventus mit dem Teilprojekt 1 Methoden und Lastansätze für Seegangslasten analysiert und für die Teststrukturen optimiert. Anhand von Naturmessungen im Testfeld und mit Hilfe von Laborversuchen werden die maßgebenden Einflussparameter untersucht, um die Lastentwicklung an den Gründungsstrukturen genauer bestimmen zu können. Mit dem kombinierten Einsatz von numerischen Simulationen und Modellversuchen werden die Lastmodelle optimiert und diese schließlich mit Hilfe der Naturmessdaten validiert.

Im Rahmen des Teilprojektes 5 des interdisziplinären Verbundvorhabens GIGAWIND *alpha ventus* an der LUH werden Untersuchungen zu Strömungsvorgängen und den aus Ihnen resultierenden Kolkphänomenen an Gründungsstrukturen für OWEA im Testfeld *alpha ventus* durchgeführt. Hierbei liegt der Fokus der Untersuchungen auf den Gründungsstrukturen vom Typ Tripod. Die Untersuchungen bestehen aus einer Kombination von Naturmessungen der Kolkiefen und -ausdehnungen im Testfeld, physikalischen Modellversuchen in den Maßstäben 1:40 und 1:12 im Wellenkanal des Franzius-Instituts bzw. im Großen Wellenkanal, sowie in der Entwicklung eines numerischen Modells zur Kolksimulation. Letztlich können hierdurch Auswirkungen auf das Tragverhalten der Gesamtanlage ermittelt und ggf. geeignete Kolkschutzmaßnahmen entwickelt werden, die zukünftig effizientere Gründungen ermöglichen.

Förderrahmen und Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung und Förderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Forschungsprojektes *GIGAWIND alpha ventus - LUH* (Förderkennzeichen 0325032).

Veröffentlichungen

HILDEBRANDT, A.; STAHLMANN, A.; SCHLURMANN, T.: Field data derived from Offshore Wind Energy Converters – Assessment and correlation of dynamic waves, 33rd IAHR Congress, Vancouver BC, 14. August 2009

STAHLMANN, A.; HILDEBRANDT, A.; SCHLURMANN, T.: Investigations on Scour Development at Offshore Wind Energy Converters in the German Offshore Test Site *alpha ventus*, 33rd IAHR Congress, Vancouver BC, 12. August 2009

STAHLMANN, A., HILDEBRANDT, A., SCHLURMANN, T.: Untersuchung von Seegangbelastungen und Kolken an Offshore-Windenergieanlagen im Testfeld *alpha ventus*, HTG-Kongress 2009, Lübeck, 11. September 2009

Nähere Informationen zum Gesamtprojekt sind unter www.gigawind.de zu finden.