

# **DYNAMISCHE BELASTUNGEN DURCH BRECHENDE WELLEN AN TRIPOD STRUKTUREN AUS DEM PHYSIKALISCHEN UND NUMERISCHEN MODELL**

von

Arndt Hildebrandt<sup>1</sup>  
Torsten Schlurmann<sup>2</sup>

## **ABSTRACT**

Coastal and near shore areas offer a large potential for offshore wind energy production due to strong and steady wind conditions. Thousands of offshore wind energy converters are projected for mass production within the next years. Detailed understanding of the extreme, dynamic wave loads on offshore structures is essential for an efficient design. Laboratory tests with breaking waves have been carried out at the Large Wave Flume to reveal more detailed insights on the impact area, duration and development of the wave induced momentum and intensity of pressures. An example illustrates the intensity of local pressures and the sensitivity to total loads exemplarily by comparison of two waves. In addition, local pressures calculated by a numerical impact simulation are compared to the Large Wave Flume experiments.

## **1. EINLEITUNG**

Mehrere tausend Windanlagen werden für die Realisierung der politischen Ziele bezüglich der zunehmenden Nutzung von Offshore Windenergieanlagen (OWEA) als erneuerbare Energieform benötigt. Um das Vorhaben wirtschaftlich effizient umzusetzen und um die Windkraft auch gegenüber alternativen erneuerbaren Energieformen konkurrenzfähig zu halten, wird eine effiziente Serienproduktion angestrebt. Aus ingenieurtechnischer Sicht lässt sich eine Struktur möglichst effizient entwerfen, je genauer die zu Grunde liegenden Berechnungsmodelle die reale Situation abbilden. Dies betrifft sowohl die Modellierung der äußeren Einwirkungen, z. B. Wind und Seegang, als auch die Genauigkeit des Strukturmodells um die Reaktion auf Grund von Einwirkungskombinationen zu bestimmen. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das Forschungsprojekt „GIGAWIND *alpha ventus*“ (BMU Förderkennzeichen: 0325032) innerhalb des Forschungsverbundes „Research at Alpha Ventus“ (RAVE) mit Fragestellungen bezüglich Design, Produktion und Monitoring von Gründungsstrukturen für OWEA. Das erste Teilprojekt behandelt unter anderem die Lastmodellierung und die zu erwartenden Einwirkungen aus brechenden Wellen (HILDEBRANDT et al., 2009).

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, hildebrandt@fi.uni-hannover.de

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing. habil., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, schlurmann@fi.uni-hannover.de

## 2. VERSUCHSREIHE IM GROSSEN WELLENKANAL

### 2.1 Modellbau

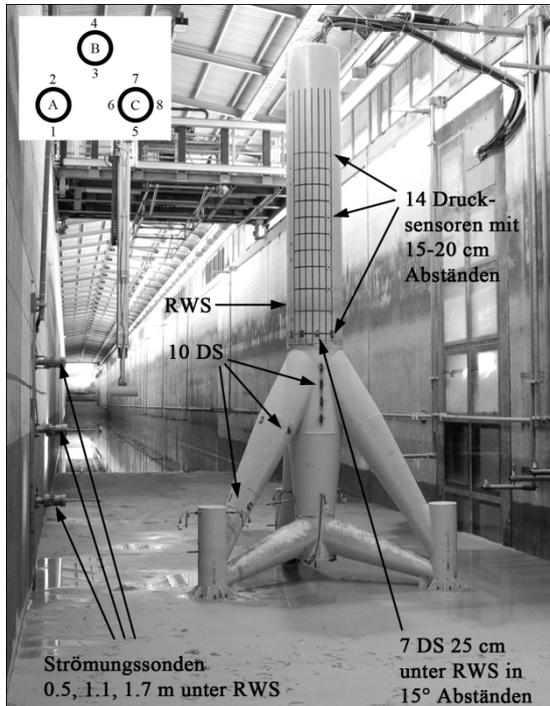


Abbildung 1: Tripod im Maßstab 1:12

An den drei Tripodfüßen A, B und C wurden insgesamt 8 Dehnungsmessstreifen 12 cm unterhalb der Sandoberkante bzw. unter der Flanschverbindung installiert, die in den Ramm-pfahl ähnlichen Rohren Rückschlüsse auf die Gesamtbelastung ermöglichen. Der Tripod steht 111 m vom Wellenblatt entfernt und die Wasserspiegelauslenkung wurde mit 24 Wellenpegeln, wovon 16 Pegel die Distanz bis zur Tripodhinterkante abdecken, registriert. Auf Höhe des Tripods und 10 m vor dem Tripod wurden mit jeweils drei NSW Strömungssonden die horizontale und vertikale Strömungsgeschwindigkeit in Wellenausbreitungsrichtung gemessen. Die Wellenblattbewegung, die Strömungssonden und die Wellenpegel wurden mit

Für die Untersuchung von brechenden Wellen im physikalischen und im kalibrierten numerischen Modell wurden im Großen Wellenkanal (GWK) am Forschungszentrum Küste (FZK) Versuche an einem Modelltripod im Maßstab 1:12 durchgeführt (Abb. 1). Der Durchmesser des Zentralrohres betrug 0,5 m und die Struktur stand in einer Wassertiefe von 2,5 m, gemessen oberhalb der 1,2 m dicken Sandschicht bis zum Ruhewasserspiegel (RWS). Der obere Teil des Modells ließ sich um seine Vertikalachse frei drehen, wodurch die 20 installierten Druckdosen in der Zylinderhülle in beliebigen Winkeln zu der von vorne einlaufenden Welle positioniert werden konnten. Weitere 10 Druckdosen wurden im unteren nicht verstellbaren Bereich des Tripods in den seitlichen Abstützungen und zwischen den zusammenlaufenden Rohren installiert. Zusätzlich wurde mit zwei Beschleunigungssensoren 1,18 m und 2,0 m über dem RWS die Bewegung des Zentralrohres erfasst.

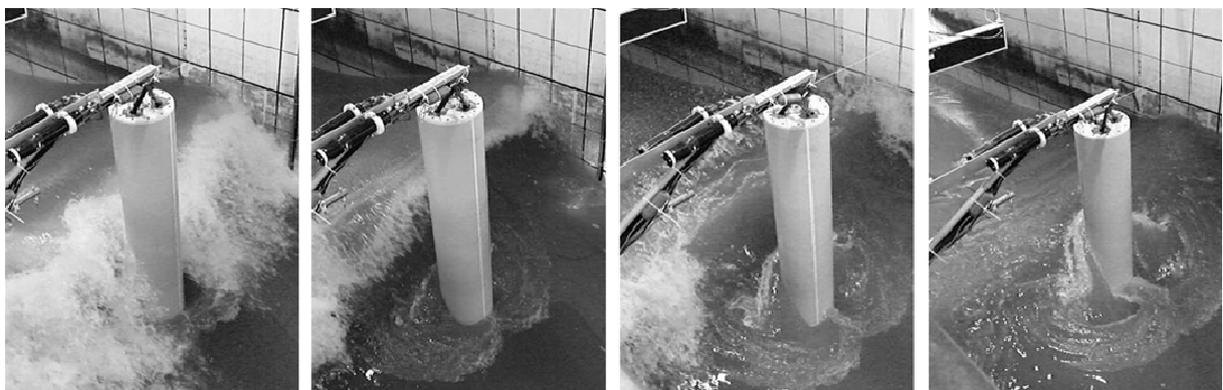


Abbildung 2: Einteilung der Wellenformen in vier Lastfälle. Im LF 1 trifft die Welle die Struktur in gebrochener Form, im LF 2 schlägt die Brecherzunge kurz vor der Struktur über, im LF 3 bildet der obere Teil eine vertikale Front und LF 4 wird an der Struktur instabil und bricht dahinter.

100 Hz, die Dehnungsmessstreifen und Beschleunigungsaufnehmer mit 600 Hz und die Druckdosen mit 10000 Hz aufgezeichnet. Die Konzentrationspunkte der Wellenpakete wurden gezielt variiert, so dass die brechenden Wellen in vier verschiedenen Abständen relativ zum Tripod in den Brechprozess übergangen, wobei der vierte Brechpunkt kurz hinter dem Tripod gewählt wurde um den quasistatischen Anteil der Welle zu bestimmen (Abb. 2). Insgesamt wurden die vier Formen mit 114 Versuchen (29+35+32+18) und ca. 60 Versuchen mit Zwischenwellenformen getestet. Das Zentralrohr wurde in 10 Grad Schritten bis zu 70 Grad zur Ausgangslage gedreht.

## 2.2 Reproduzierbarkeit der Wellen und Wellenparameter

Auf Grund der begrenzten Anzahl von Drucksensoren wurde das Zentralrohr um die vertikale Achse in 10 Grad Schritten gedreht, um die Ausbreitung des Druckschlags in einem möglichst großen Bereich mit relativ hoher Sensordichte erfassen zu können. Dieses Vorgehen setzt eine gute Reproduzierbarkeit der brechenden Wellenformen voraus, um die einzelnen Versuche im Anschluss vergleichen zu können. Der Wasserstand wurde regelmäßig überprüft und bei Bedarf korrigiert. Das Sandprofil hat sich während der Vorversuche für die Ermittlung der geeigneten Konzentrationspunkte gesetzt und verfestigt, so dass die Wellen während der systematischen Versuchsreihe gut reproduzierbar waren, was in Abbildung 3 mittels der gut übereinstimmenden Wellenpegel und Druckmessungen veranschaulicht ist. In Tabelle 1 sind von drei Messgrößen die mittlere maximale und minimale Auslenkung der brechenden Welle als auch die Wellenhöhe  $H$  und die Periode  $T$  angegeben. Die Werte wurden aus 32 Versuchen der dritten Wellenform mit dem Downcrossing Verfahren ermittelt, weil mit der Methode die anlaufende Wellenfront aus Sicht der Struktur eingeschlossen wird. Die Wellenblattbewegung ist eine direkte Kontrollgröße für die Wiederholbarkeit der Wellengenerierung und weist mit einer Standardabweichung von einem Millimeter bei einer „Stroke-Wellenhöhe“ von einem Meter praktisch keine Streuung auf. Dies gilt nicht nur für den maßgebenden Stroke sondern ebenfalls für das gesamte Wellenpaket. Je näher die Messgrößen am Brechpunkt der Welle bzw. weiter entfernt im Kanal liegen, desto größer werden die Standardabweichungen. Die Wellen überlagern sich zunehmend entlang des Kanals und kurz hinter dem Wellenpegel bei 105 m bildet sich die die Ablösung am Wellenkamm. Von besonderem Interesse ist die Standardabweichung an der Vorderkante des Zentralrohres, die selbst dort mit Effekten wie Luft-eintrag in der Brecherzunge nur 3,4 cm in Bezug auf  $H$  beträgt.

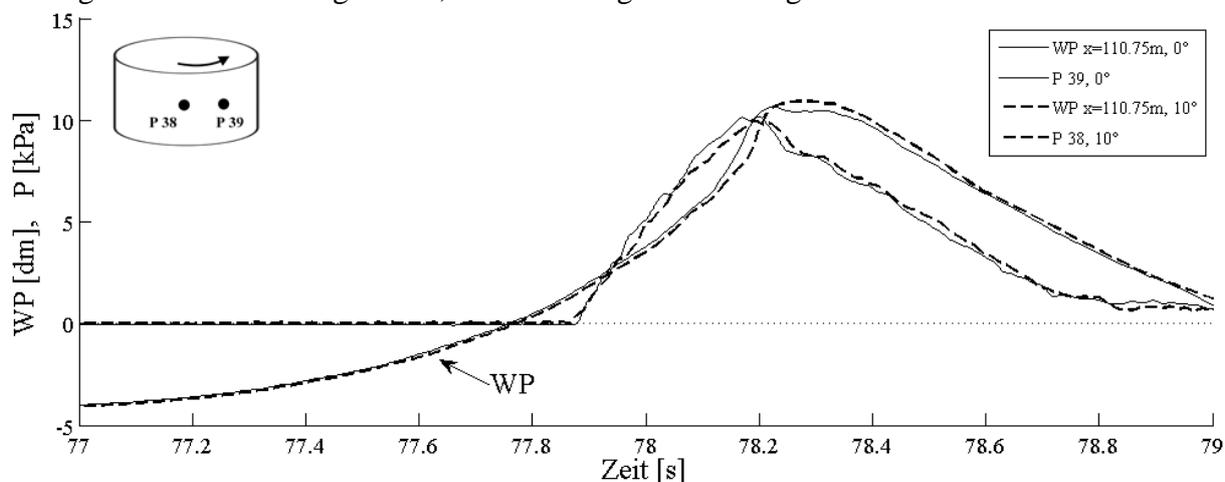


Abbildung 3: Gleiche Positionen von Drucksensoren nach einer Zylinderdrehung zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit einer Welle in unterschiedlichen Versuchen.

|            | Max [m] | Min [m] | H [m] | Std(H) [m] | T [s] | Std(T) [s] |
|------------|---------|---------|-------|------------|-------|------------|
| Stroke     | 0,60    | -0,40   | 1,00  | 0,001      | 4,96  | 0,006      |
| WG 105,00m | 1,06    | -0,45   | 1,51  | 0,013      | 4,34  | 0,024      |
| WG 110,75m | 1,09    | -0,44   | 1,53  | 0,034      | 4,16  | 0,025      |

Tabelle 1: Mittelwerte der maximalen, minimalen Messwerte sowie Wellenhöhen und Perioden mit Standardabweichungen für 32 gleiche Versuchswellen vom LF 3.

### 3. DYNAMISCHE BELASTUNGEN DURCH BRECHENDE WELLEN

Im Rahmen der gegebenen Reproduzierbarkeit können die Versuchswellen miteinander verglichen werden. In Abbildung 4 entsprechen positive DMS-Werte Zugspannungen und negative Werte entsprechen Druckspannungen in den vertikalen Fußrohren unterhalb der Sandoberkante. Aus dem Verlauf der vier DMS lässt sich die Tripodverformung während des Wellenbergs und des Druckschlags ableiten. Alle drei Führungsrohre für die Rammpfähle („Pile Sleeves“) biegen sich während des Wellenbergs nach vorne, wobei sich die beiden vorderen Rohre symmetrisch verformen. Zusätzlich zeigen die Beschleunigungsaufnehmer mit dem einsetzenden Druckschlag eine zuerst ausweichende Bewegung im oberen Zentralrohr an, so dass sich das skizzierte Verformungsbild ergibt. Auffällig sind die kurzzeitig entgegen gesetzten Dehnungen in den DMS 1 und 4. Mit der aufschlagenden Welle wird der gestauchte DMS 1 positiv gedehnt und der gedehnte DMS 4 gestaucht. Zusammen mit den Dehnungen in den DMS 2 und 3 lässt sich erkennen, dass der Tripod um einen mittigen Fußpunkt rückwärts gekippt wird.

Im Folgenden wird die Relevanz der Extremdrücke und deren Position bzw. Hebelarme an der Struktur am Beispiel zweier Versuchswellen verdeutlicht (Abb. 4, 5). Das Zeitfenster beginnt mit dem ansteigenden Wellenberg und das Druckdosensignal auf Höhe der maximalen Wasserauslenkung ( $H_{r,b}=1$ , vgl. auch Abb. 7) kennzeichnet den einsetzenden Druckschlag. Die DMS zeigen den qualitativen Verlauf der Strukturantwort an den Fußpunkten des Tripods für zwei gleich generierte Wellen im LF 3. Im Vergleich zu dem Druckschlag an der Zylindervorderseite ist der um ca. 20 ms versetzte Peak in den DMS-Signalen zu erkennen. Nach dem Druckschlag schwingen die DMS mit der Eigenfrequenz des Tripods von ca. 11,7 Hz und enthalten zusätzlich noch kleine überlagerte Schwingungen von ca. 82 Hz, mit der die konstruktionsbedingt stark gespannte, drehbare Zylinderhülle schwingt. Die 82 Hz bilden auch die z. T. starken Schwingungen in den Druckdosensignalen (Abb. 5), die das Signal während der Schwingphase des Zylinders entgegen der auftreffenden Welle erhöhen und es auf Grund der geringeren Relativgeschwindigkeit während der Rückschwingung reduzieren. Das dynamische Verhalten bezüglich Druckschlagdauer und Eigenfrequenz ist bedeutend, da es sich sowohl auf die gemessene Anstiegszeit des Drucksignals als auch auf den gemessenen Maximaldruck auswirkt, was in diesem Beitrag allerdings nicht weiter behandelt wird. In Abbildung 4 wird anhand der dargestellten DMS 2 und 3 deutlich, dass die Belastung der zweiten Welle ca. 20% höhere Spannungen in den Fußrohren erzeugt als die erste Versuchswelle. Hierbei ist bemerkenswert, dass die Druckmesswerte aller Dosen bis zur relativen Höhe  $H_{r,b}=0,38$  exakt übereinander liegen und bis  $H_{r,b}=0,80$  einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen. Die signifikanten Druckunterschiede vollziehen sich hauptsächlich in den abgebildeten Höhen  $H_{r,b}=0,9$  bis 1,1 (Abb. 5), da auch die Messwerte bei  $H_{r,b}=1,2$  in beiden Versuchen wieder einen annähernd gleichen Verlauf annehmen.

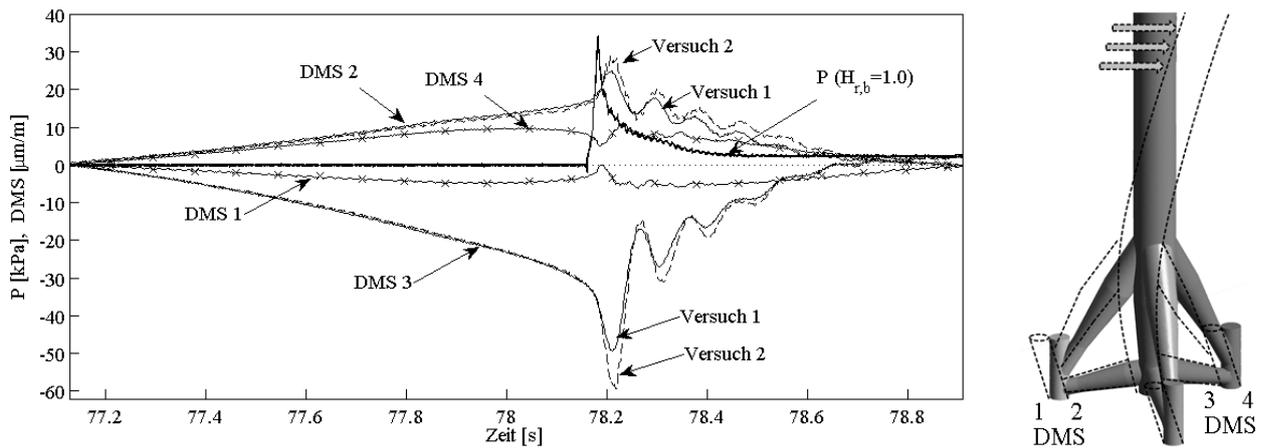


Abbildung 4: Differenzen in den DMS-Zeitreihen 2 und 3 mit der Versuchswelle LF 3 in den Versuchen 1 und 2 sowie Zeitversatz zwischen der Druckeinwirkung P und den Auflagerreaktionen an den DMS (links). Biegeform abgeleitet aus den DMS-Zeitreihen 1 bis 4 (rechts).

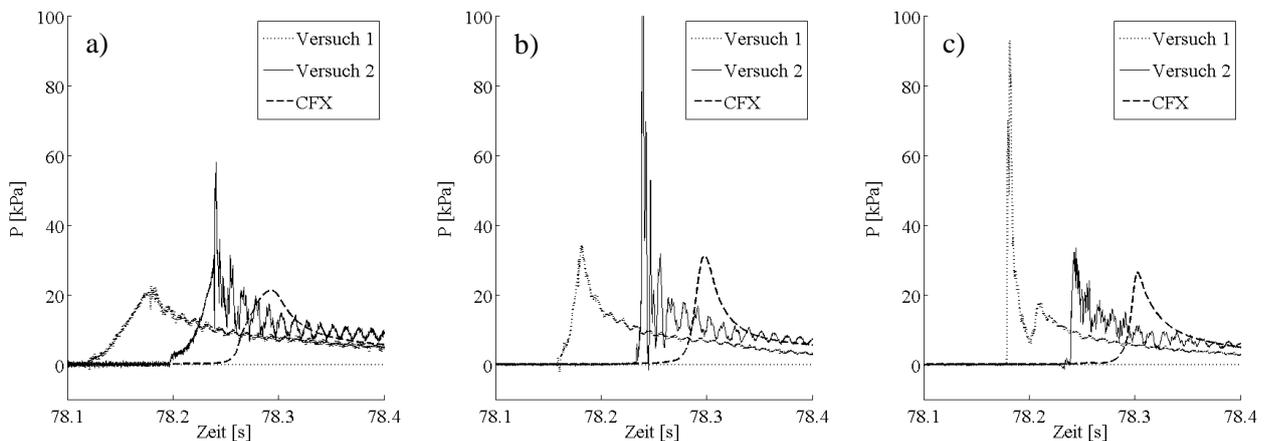


Abbildung 5: Zeitreihen der lokalen Wasserdrücke im physikalischen und numerischen Modell für Wellen im LF 3 an den Positionen  $H_{r,b} = 0,9$  (a),  $1,0$  (b) und  $1,1$  (c) 60 ms zueinander versetzt.

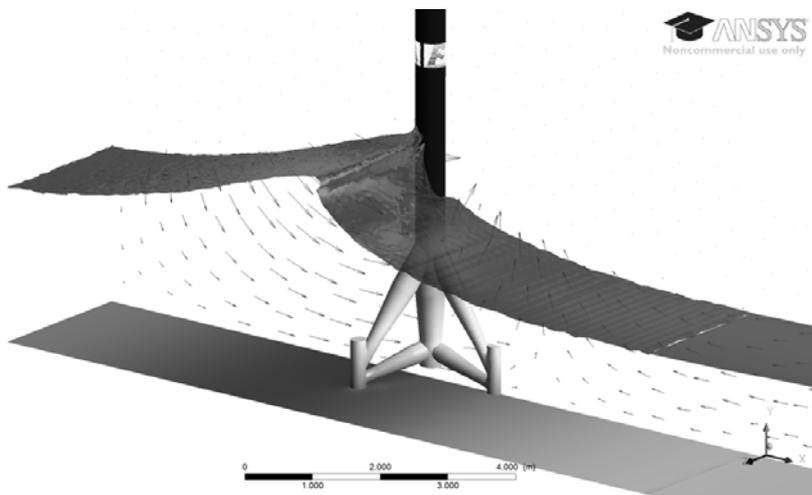


Abbildung 6: Brechende Welle (LF 3) im numerischen 1:12 Modell

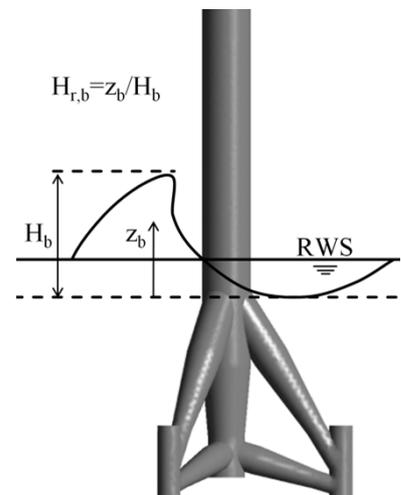


Abbildung 7: Definition von  $H_{r,b}$

In diesem Fall erzeugen Druckunterschiede über 20-30% der Brecherhöhe ( $H_{r,b}$  1,1-0,9=0,2) eine maximale Lastdifferenz von ca. 20%. Die Mitte dieses Druckabschnittes liegt ungefähr auf der Kammhöhe der brechenden Welle bei  $H_{r,b}=1,0$  und bildet somit einen äußerst langen Hebelarm. Die Differenzen in den DMS setzen sich u.a. aus den unterschiedlichen Beträgen der resultierenden Kräfte als auch aus den ungleichen Hebelarmen der integrierten Drücke zusammen. Beispielsweise beträgt der maximal gemessene Druck im ersten Versuch ca. 90 kPa bei  $H_{r,b}=1,1$  während im zweiten Versuch 260 kPa etwas tiefer bei  $H_{r,b}=1,0$  gemessen wurden (Abb. 5b, c). Die Druckwerte können aus oben bereits genannten Gründen nicht direkt miteinander verglichen werden, zeigen allerdings qualitativ wie intensiv und lokal die Belastungen wirken. In welchem Verhältnis dieser intensive Abschnitt zur restlichen Wellenlast steht, wie stark die Drücke bereichsweise streuen und wie genau sie sich mit bisherigen Rechenansätzen und entsprechenden Randbedingungen berechnen lassen ist aktueller Gegenstand weiterer Analysen. Mit Hilfe der GWK Versuche wurde ein dreidimensionales numerisches Modell erstellt (Abb. 6), um u.a. Drücke und Geschwindigkeiten an nicht messbaren Stellen zu untersuchen. Die flächige Druckverteilung auf der gesamten Struktur kombiniert mit der Geschwindigkeitsverteilung des Wassers und Wellenformeigenschaften unterstützen die Versuchsanalyse (HILDEBRANDT, 2010). In der Abbildung 5 sind neben den beiden GWK Versuchen zusätzlich die Zeitreihen aus dem CFD Modell an den gleichen Positionen gestrichelt dargestellt. Ein weiterer Vorteil des CFD Modells ist die schwingungsfreie Struktur, die für Resonanzanalysen bei Bedarf auch mit einem FEM Modell gekoppelt werden kann. Die numerischen Drücke sind deshalb nicht mit der 82 Hz Schwingung überlagert und zeigen quasi einen gefilterten Verlauf der Messungen. In den drei Abbildungen lassen sich die tendenziell übereinstimmenden Charakteristiken bezüglich der Anregungsfrequenz im Einzelnen durch die kürzer werdenden Anstiegszeiten, die Peak-Dauer und durch die Belastungsabnahme über die Zeit erkennen. Außerhalb dieses sehr dynamischen Bereichs stimmen die numerischen Druckverläufe sehr gut mit den gemessenen Werten überein.

#### **4. ZUSAMMENFASSUNG**

Innerhalb der nächsten 10 bis 20 Jahre ist die Installation mehrerer tausend Windkraftanlagen in der Nordsee geplant. Für ein effizientes serienreifes Design werden u.a. möglichst detailierte Informationen über die zu erwartenden Extremlasten benötigt. Vor diesem Hintergrund wurden Modellversuche im GWK durchgeführt, um die Intensität und Positionen der auftretenden Drücke zu messen. Der Vergleich identisch generierter Wellen zeigt, dass Druckunterschiede hauptsächlich innerhalb einer Spanne von 20-30% der Wellenbrecherhöhe auftreten und Differenzen in der maximalen qualitativen Gesamtbelastung von bis zu 20% verursachen. Darüber hinaus zeigen kalibrierte CFD Modelle gute Übereinstimmungen mit den Messdaten und bieten wertvolle Möglichkeiten für zusätzliche Analysen der brechenden Wellen.

#### **5. SCHRIFTTUM**

HILDEBRANDT, A., STAHLMANN, A., SCHLURMANN, T.: Field data derived from Off-shore Wind Energy Converters - Assessment and correlation of dynamic wave loads, Proceedings of the 33rd IAHR Congress, Vancouver BC, August 2009

HILDEBRANDT, A.: Physical Modeling and CFD Simulation of Wave Slamming on Off-shore Wind Turbine Structures, ANSYS Conference & 28. CADFEM user's meeting, Aachen, November 2010