Validierung eines numerischen Modells zur Vorhersage von Offshore-Rammschall mit Hilfe von Hydrophon Line-Array Messungen

Kristof Heitmann, Marcel Ruhnau, Stephan Lippert, Otto von Estorff
Institut für Modellierung und Berechnung, Technische Universität Hamburg-Harburg, 21073 Hamburg, Deutschland
Email: mub@tuhh.de

Einleitung

Zur Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen werden Pfähle mit Hilfe von Impulshämmern in den Meeresboden gerammt. Das Rammen mit oftmals hohen Schlagenergien führt zu einem erheblichen Schalleintrag in das den Pfahl umgebende Meereswasser. Zum Schutz der maritimen Lebewesen wurden Grenzwerte sowohl für den Einzelereignispegel SEL als auch für den Spitzenschalldruckpegel L_{peak} eingeführt [1], [2]. Um diese Grenzwerte einzuhalten ist es oft zwingend notwendig Schallschutzsysteme einzusetzen.

Während des Projektes „BORA-Berechnung von Offshore Rammschall“ wurden Offshore-Messkampagnen (OMK) in verschiedenen Windparks durchgeführt. Ziel dieser OMK war es, neben einem fundierten physikalischen Verständnis, eine breite Datenbasis zur Validierung von numerischen Modellen zu schaffen. Während der Errichtung des Windparks „Borkum Riffgrund I“, in welchem eine der Messkampagnen durchgeführt wurde, wurde das sogenannte „IHC Noise Mitigation System 6900“ (NMS) verwendet. Dieses Schallschutzsystem ist ein Hüllrohr, welches während der Rammung den Pfahl umgibt und somit den vom Pfahl ins Wasser abgestrahlte Schall mindert. Das NMS besteht aus zwei Stahlwänden, zwischen denen sich Luft befindet. Weiterhin sind die beiden Stahlwände durch Gummielemente entkoppelt. Durch die Minderung des Schalls, welcher direkt vom Pfahl ins Wasser abgestrahlt wird, rückt die Schallabstrahlung vom Boden in den Fokus.

In vorangegangen Arbeiten von Reinhall und Dahl konnte die Schallabstrahlung ohne Schallschutzsystem bereits in drei charakteristische Phasen unterteilt werden [9], [10]. Jedoch ändert sich diese Schallabstrahlung maßgeblich wenn ein Schallschutzsystem in der direkten Umgebung vom Pfahl verwendet wird. Daher wird in diesem Beitrag in ein bestehendes numerisches Modell zur Vorhersage von Offshore Rammschall das NMS implementiert. Ziel ist es dabei, zunächst das Modell zu validieren und anschließend die Schallabstrahlung während der Pfahlrammung unter Verwendung von Schallschutzsystemen zu untersuchen. Zur Validierung des Modells werden, neben Messungen von Einzelhydrophonen, Messungen eines Hydrophon-Line-Arrays (HLA) verwendet. Um die Messungen des HLAs und die Ergebnisse der Berechnung des numerischen Modells auszuwerten und zu interpretieren, werden diese mit dem MUltiple-SIgnal-Classification (MUSIC)-Beamformer analysiert.

Charakteristik der Schallabstrahlung während der Offshore Pfahlrammung

Zunächst werden in diesem Abschnitt die bisherigen Erkenntnisse bezüglich der Wellenausbreitung während der Offshore-Pfahlrammung vorgestellt. Wie einleitend erwähnt, unterteilten Reinhall und Dahl diese Schallausbreitung, wenn kein Schallschutzsystem Verwendung findet, in drei Phasen. Aufgrund des Rammschlags mit einem Impulshammer auf den Pfahl entsteht in diesem eine Quasi-Logitudinalwelle. Aufgrund der Querkontraktion der Pfahlwände wird das pfahlumgebende Wasser verdrängt und es entsteht im Wasser eine akustische Welle. Aufgrund der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten vom Stahl und Wasser wird die Welle im Wasser unter einem Winkel ϕ abgestrahlt. Der Winkel ϕ lässt sich wie folgt abschätzen: $\phi = sin^{-1}(c_{Wasser}/c_{stahl})$. Erreicht die Quasi-Logitudinalwelle den vom Meeresboden umgebenen Teil des Pfahls, wird unter dem gleichen Mechanismus Energie in den Boden abgestrahlt. Dabei nimmt die Energie der Welle stets ab und erreicht letztendlich den Pfahlfuß, an dem die Welle reflektiert wird. In der dann beginnenden zweiten Phase entstehen wiederum Wellen im Boden und im Wasser jedoch aufgrund der umgekehrten Bewegungsrichtung der Quasi-Logitundinalwelle im Pfahl mit einem umgekehrten Winkel. Letztendlich erreicht die Welle den Pfahlkopf, wird dort erneut reflektiert und die dritte Phase beginnt. In dieser Phase wird mit dem gleichen Winkeln wie in Phasen 1 Energie in das Wasser und in den Boden abgestrahlt, bis die Energie der Quasi-Longitudinalwelle komplett abgeklungen ist.

Es ist anzumerken, dass noch keine Erkenntnisse bezüglich der charakteristischen Schallabstrahlung während der Offshore-Pfahlrammung unter der Verwendung eines Schallschutzsystemes vorliegen. Weiterhin wurden alle Aussagen dieser theoretischen Untersuchungen mit Hilfe eines numerischen Modells hergeleitet, in welchem der Meeresboden als homogener, fluider Halbraum ohne Schichtungen implementiert ist. Jedoch wird bereits in der Literatur auf einen möglichen Einfluss der Schichtungen auf die Wellenausbreitung hingewiesen [4], [5].

MUSIC-Beamformer

Der MUSIC-Beamformer beruht auf einer Eigenwertzerlegung der Kovarianzmatrix. Annahme dabei ist es, dass der Signal- und der Rauschraum orthogonal zueinander stehen. In dieser Annahme begründet, lässt sich folgendes

Pseudospectrum B definieren [6]:

$$B(\omega,\theta) = \frac{1}{a^H(\omega_p)GG^Ha(\omega_p)}, \quad (1)$$

wobei $a(\omega,\theta) = e^{i\cdot\omega\cdot\frac{m\cdot d\cdot sin(\theta)}{c}}$ ein Steuerungsvektor ist und die Matrix G den Rauschraum aufspannt. Wenn nun der Vektor a orthogonal zum Rauschraum ist, hat das Funktional ein Maximum. In diesem Fall liegt ein gesuchtes Signal mit der definierten Frequenz ω und dem definierten Winkel θ vor.

Numerisches Modell

In diesem Abschnitt wird die Implementierung des NMS in das bestehende Modell beschrieben. Detaillierte Ausführungen zu dem bestehenden Modell befinden sich in Heitmann [7]. Das verwendete Modell besteht aus dem Pfahl, dem Wasser und dem Boden. Zur Diskretisierung des Berechnugnsgebietes wird die Finite-Elemente-Methode verwendet. Um eine möglichst geringe Berechnungszeit zu erlangen, wird eine 2D-rotationssymmetrische Formulierung verwendet.

Wie eingangs beschrieben, besteht das NMS aus zwei Stahlwänden, welche durch Gummielemente entkoppelt sind. Der schematische Aufbau des Schallschutzsystems ist in Abbildung 1 abgebildet. Eine Hauptanforderung für die realitätsgetreue Modellierung des NMS sind die Gummielemente. Um das Materialverhalten dieser Elemente wiederzugeben wird das Mooney-Rivlin-Materialmodell verwendet. Im Folgenden wird dieses Modell „Detailmodell“ genannt.

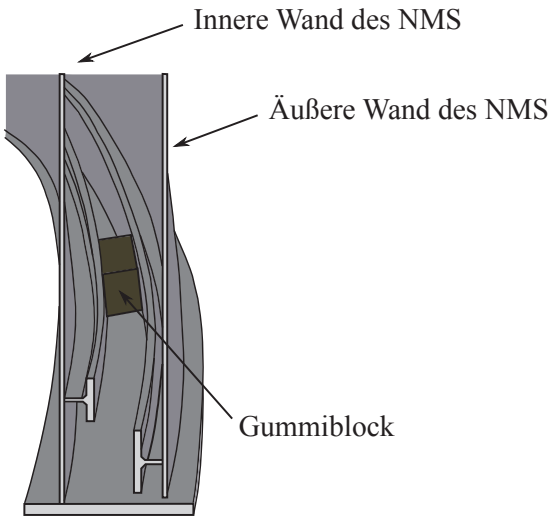

Abbildung 1: Schematischer Aufbau des NMS

Der resultierende Modellaufbau ist in Abbildung dargestellt. Weiterhin wird ein zweites Modell aufgebaut, in welchem das NMS durch eine absorbierende Randbedingung ersetzt wird. Verwendung findet hierbei eine Impedanzrandbedingung. Bezeichnet wird dieses Modell als Ersatzmodell. Ziel dieses Modells ist es, die maximal erreichbare Schallminderung für ein derartiges System zu bestimmen.

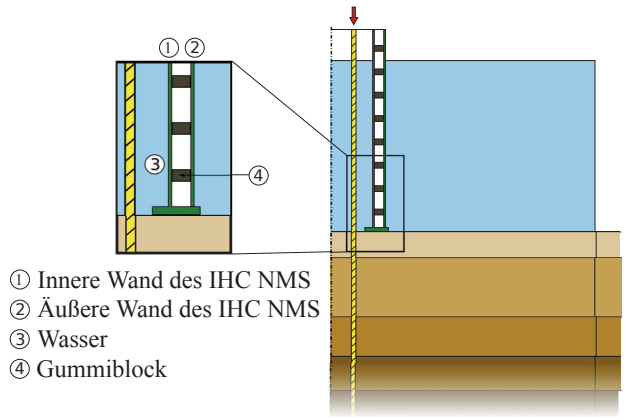

Abbildung 2: Schematischer Aufbau des numerischen Modells bestehend aus dem Pfahl, dem Wasser, dem Boden und dem „IHC Noise Mitigation System“

Ergebnisse

Im ersten Schritt wird das Modell durch Messungen eines Einzelhydrophons validiert. Gemessen wurde der akustische Druck im Wasser in 93 m zum Pfahlmittelpunkt und 2 m über dem Meeresgrund. Bei der Rammung belief sich die Schlagenergie auf 600 kJ. Der gemessene und die berechneten Einzelereignispegel SEL sind in der folgenden Tabelle 1 gegenübergestellt.

Tabelle 1: Gemessene und berechnete Einzelereignispegel SEL

	Messung [db]	**Detailmodell [db]**	**Ersatzmodell [db]**
SEL	174,7	173,3	172,9
ΔSEL	-	1,4	1,8

Zunächst wird eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen der Messung und den Berechnungen ersichtlich. Die Abweichungen zur Messung belaufen sich auf $-1,4$ dB (Detailmodell) beziehungsweise auf $-1,8$ dB (Erstatzmodell). Weiterhin zeigt sich, dass die resultierenden Pegel der numerischen Modell nahezu gleich sind und hierdurch die Annahme getroffen werden kann, dass durch das NMS nahezu der gesamte Schall abgestrahlt von dem Pfahl in das Wasser an der Ausbreitung gehindert wird.

Im nächsten Schritt wird die Wellenausbreitung unter der Verwendung eines Schallschutzsystems untersucht. Die hierzu verwendeten Messungen des HLAs wurden in 18 m zum Pfahlmittelpunkt durchgeführt. Das HLA besteht aus 16 Hydrohonen und das erste Hydrohon befindet sich 2 m über dem Meeresgrund. Die Abstände zwischen den weiteren Hydrophonen belaufen sich auf $1,5$ m.

Die gemessenen und durch die numerischen Modelle berechneten Ergebnisse sind in den Abbildungen 3 bis Abbildung 5 gezeigt. Hierbei ist stets die Amplitude des Pseudospektrums über den Winkel und die Frequenz als Contourplot dargestellt.

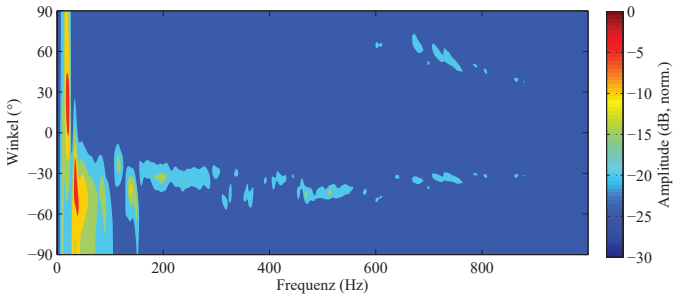

Abbildung 3: Contourplot des Pseudospectrums des MUSIC-Beamformers für die Messung mit dem HLA bei einer Rammenergie von 600 kJ

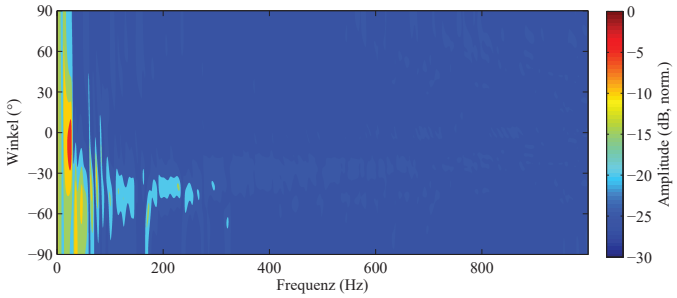

Abbildung 4: Contourplot des Pseudospectrums des MUSIC-Beamformers für das Detailmodell bei einer Rammenergie von 600 kJ

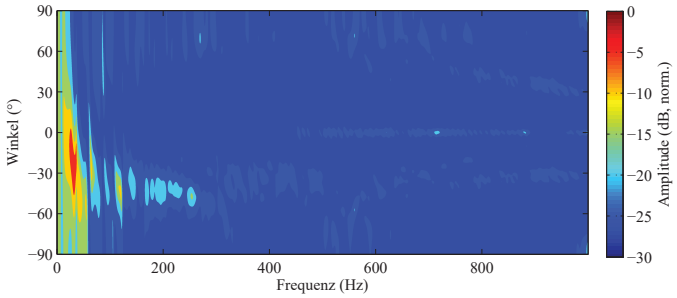

Abbildung 5: Contourplot des Pseudospectrums des MUSIC-Beamformers für das Ersatzmodell bei einer Rammenergie von 600 kJ

Ersichtlich wird in den drei Abbildungen die hohe Übereinstimmung zwischen der Messung und der Berechnung. Weiterhin erkennt man, dass ein Großteil der akustischen Energie unter Winkeln zwischen 15° und 60° abgestrahlt wird. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen wird im nächsten Schritt die Amplitude des Pseudospektrums über die Frequenz gemittelt. Das Ergebnis dieser Mittelung ist in Abbildung 6. Dabei erhärtet sich der vorher festgestellte Sachverhalt. Begründen lässt sich die Abstrahlung unter diesen Winkeln wie folgt: Im Meeresboden breitet sich eine Wellenfront abgestrahlt vom Pfahl aus und diese Wellenfront strahlt in den folgenden Zeitpunkten Energie in das umliegende Wasser ab. Es entsteht eine rundliche Wellenfront ähnlich der, die von einer Punktquelle abgestrahlt wird. Während diese sich ausbreitet, trifft sie auf die verschiedenen Hydrophone des Line-Arrays und verändert dabei laufend den Winkel, der vom Beamformer festgestellt wird. Der Zusammenhang ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Die Ergebnisse sind weiterhin als Kontourplot in Abbildung 8 veranschaulicht. In dieser Abbildung ist im Wasser der akustische Druck und im Boden der Betrag der Beschleunigungen dargestellt. Deutlich ersichtlich ist in den Ergebnissen auch die Ausbildung einer runden Wellenfront.

Weiterhin zeigt sich der Einfluss der Implementierung der Schichtungen des Meeresbodens. Durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der einzelnen Schichten werden die Wellen gebeugt und die Bewegungsrichtung teilweise stark beeiflusst. Verglichen mit den theoretischen Beobachtungen von Reinhall und Dahl, welche auf einem homogenen, fluiden Meeresboden beruhen, laufen die Wellen in diesem verwendeten Modellierungsansatz nicht mit einem definierten Winkel aus dem Berechnungsgebiet heraus. Stattdessen werden Sie teilweise durch die Beugung in Richtung des Wasser abgelenkt. Die Stärke der Beugung hängt dabei vom Gradient der P-Wellengeschwindigkeit des Meeresbodens ab.

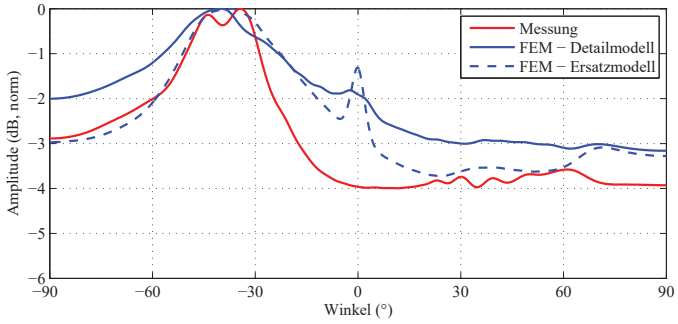

Abbildung 6: Darstellung der über die Frequenz gemittelten Amplituden des Pseudospektrums des Beamformers über den Winkel für die Messung, das Detailmodell und das Ersatzmodell

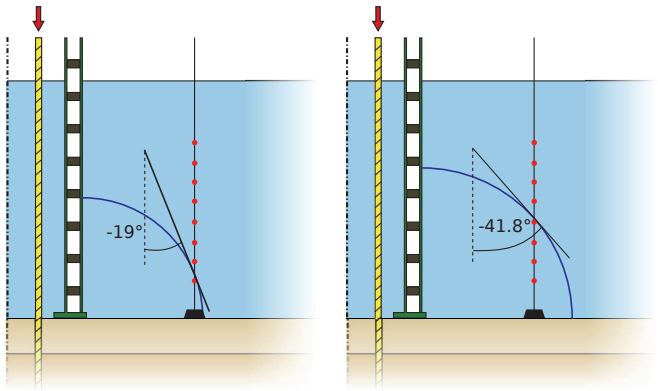

Abbildung 7: Schematische Darstellung der charakteristischen Wellenfronten, hervorgerufen durch die Schallabstrahlung des Meeresbodens zu zwei verschiedenen Zeitpunkten

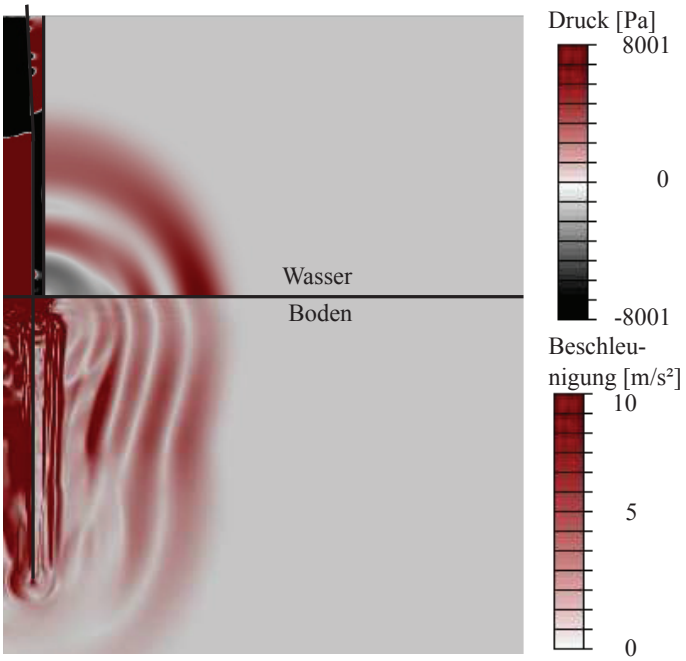

Abbildung 8: Contourplot des Pseudospectrum des MUSIC-Beamformers für das Ersatzmodell bei einer Rammenergie von 600 kJ

Zusammenfassung

Es wurde die Implementierung des NMS in ein bestehendes Modell vorgestellt. Neben einer detaillierten Implementierung wurde ein vereinfachtes Ersatzmodell aufgebaut. Durch den Abgleich der beiden Modelle mit einer Einzelhydrophonmessung konnte gezeigt werden, dass beide Modell valide Ergebnisse liefern und dem Einzelereignispegel an einem Ort realitätsgetreu wiedergeben. Weiterhin führte diese Betrachtung zu dem Schluss, dass das NMS der Vorstellung eines ideal-funktionierenden Schallschutzsystems sehr nahe kommt.

In einem nächsten Schritt wurde die Wellenausbreitung untersucht, wenn ein Schallschutzsystem in der direkten Umgebung vom Pfahl verwendet wird. Durch die Verwendung eines solchen Systems gewinnt die Schallabstrahlung des Bodens an Bedeutung. Durch die Validierung der Berechnungen mit Hilfe von Messungen des HLAs konnte zunächst die realitätsgetreue Wiedergabe der Wellenfronten des numerischen Modells aufgezeigt werden. Es zeigte sich sowohl in den Messungen als auch in den numerischen Berechnungen, dass sich eine runde Wellenfront ausbreitet. Der vom Beamformer berechnete Winkel ändert sich dadurch stetig und hat ein Energiemaxium im Bereich von 15° bis 60°.

Danksagung

Die diskutierten Ergebnisse entstanden aus Forschungsaktivitäten, die im Rahmen des Projekts BORA vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages (FKZ 0325421A) gefördert werden.

Literatur

[1] Werner, S.: *Information Unterwasserlärm: Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen*, 2011. Bundesamt für Mensch und Umwelt.

[2] Müller, A., Zerbs, C.: *Offshore-Windparks: Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen ; aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen ; Anwendungshinweise ; Auftraggeber: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*, 2011.

[3] Koschinski, S., Lüdemann, K.: *Entwicklung schallmindernder Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen*, 2013. BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.

[4] Podolski, C., Wilken D., Rabbel, W.: *Boden und darüber hinaus: Parameter zur Vorhersage von Körperschalleinträgen bei Rammereignissen.* Fortschritte der Akustik-40. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Oldenburg, Deutschland, 2014.

[5] Lippert, T., von Estorff, O.: *The significance of parameter uncertainties for the prediction of offshore pile driving noise.* J. Acoust. Soc. Am., 136, 2014.

[6] Schmidt, R. O.: *Multiple emitter location and signal parameter estimation.* IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 34(3):276–280, März 1986.

[7] Heitmann, K.: *Vorhersage des Unterwasserschalls bei Offshore-Rammarbeiten unter Berücksichtigung von Schallminderungsmassnahmen,* Dissertation (in Vorbereitung), Hamburg, Deutschland, (2016).

[8] Schossau, T, Heitmann, K., Lippert, S., von Estorff, O.: *Vortrag zum AK Hydroschall: Modellierung des IHC Noise Mitigation Screen, AK Hydroschall*, Hamburg 2015.

[9] Reinhall, P. G., Dahl, P. H.: *Underwater Mach wave radiation from impact pile driving: Theory and observation.* The Journal of the Acoustical Society of America, 130(3):1209–1216, 2011.

[10] Reinhall, P. G., Dahl, P. H.: *Acoustic radiation from a submerged pile during pile driving. OCEANS 2010*, 1–4. IEEE, 2010.