

Zur Vorhersage von Offshore-Rammschall mittels Wellenzahlintegration

Tristan Lippert, Kristof Heitmann, Marcel Ruhnau, Stephan Lippert und Otto von Estorff

Institut für Modellierung und Berechnung, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg

E-mail: tristan.lippert@tuhh.de

Einleitung

Die negativen Auswirkungen von Offshore-Rammschall auf die marine Umwelt geraten im Zuge des massiven Ausbaus der Offshore-Windenergie mehr und mehr in den Fokus. Alle heute gängigen Gründungsstrukturen basieren auf Pfählen, die in den Boden gerammt werden. Die dabei entstehenden sehr hohen Schallpegel stellen eine potentielle Bedrohung vor allem für die marinen Säuger dar, zu deren Schutz entsprechende Grenzwerte erlassen wurden [1]. Ein numerisches Modell zur Vorhersage von Rammschall ist daher sowohl für die Abschätzung von Schallpegeln geplanter Parks von Interesse, als auch zur Optimierung von Schallschutzmaßnahmen zur Einhaltung der erwähnten Grenzwerte.

Aufgrund der in der Regel großen Abmessungen des betrachteten Gebiets, das sich über einige Kilometer rund um die Baustelle erstreckt, scheidet eine globale Modellierung, z.B. mittels einer Finite-Elemente-Modellierung (FE) aus. Es gilt daher ein hybrides Simulationsmodell zu entwickeln. Dieses besteht zunächst aus einem hochauflösendem FE-Modell zur Abbildung des komplexen Eindringvorgangs des Pfahls in den mehrphasigen Boden und der Interaktion mit exemplarischen Schallschutzmaßnahmen. Anschließend werden die so ermittelten akustischen Drücke im Nahfeld des Pfahls an ein Ausbreitungsmodell gekoppelt, das es erlaubt, Schalldrücke in großen Entfernungen zum Pfahl effizient vorauszusagen.

Im Rahmen dieses Beitrags wird zunächst ein Überblick über den Aufbau des Modells gegeben und anschließend eine Validierung mit Hilfe von Messdaten vorgenommen.

Modellierungsansatz

Hinsichtlich der Beschreibung des FE-Modells sei auf Heitmann et. al [2] verwiesen.

Als Ausbreitungsmethode wurde ein Wellenzahlintegrationsansatz (WI) gewählt, welcher von einem rotations-symmetrischen, entfernungsunabhängigen Wellenleiter ausgeht und eine vollständige Lösung der Wellengleichung für periodische Anregungen liefert, siehe z.B. Jensen et. al. [3]. Die erwähnte Annahme entfernungsunabhängiger Schichten gilt gemeinhin als größte Einschränkung dieses Verfahrens in seiner grundlegenden Variante. Für den vorliegenden Anwendungsfall, relativ tieffrequenter Signale in der relativ flachen Nordsee, ist diese Limitierung aber von untergeordneter Bedeutung.

Die Kopplung zum FE-Modell erfolgt über die Annahme eines Punktquellenarrays entlang der Symmetrieach-

se des Pfahls. Die Spektren der einzelnen Quellen werden gemäß der dominanten Abstrahlcharakteristik des Pfahls aus dem Nahfeldmodell bestimmt. Die Verifizierung des WI-Modells am äußeren Rand des FE-Modells zeigt einen sehr hohen Übereinstimmungsgrad. Für eine detailliertere Beschreibung siehe Lippert und von Estorff [4], sowie Lippert und Lippert [5].

Validierung

Die Validierung des Modells wird am Beispiel von Messungen im Park BARD Offshore I vorgenommen. Im Rahmen der Bauarbeiten wurden Pfähle mit einer Länge von etwa 85 m und einem Durchmesser von etwa 3,5 m bei einer Wassertiefe von ca. 40 m in den Boden gerammt. Der Schalldruck wurde entlang verschiedener Achsen in Entfernungen bis 1500 m gemessen [6].

Im Rahmen der Validierung stellte sich heraus, dass die Berücksichtigung des geschichteten Meeresbodens von großer Bedeutung für eine genaue Vorhersage ist. Des Weiteren konnte durch die Berücksichtigung der Dämpfung der verschiedenen Schichten eine signifikante Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden.

Hierbei stellt sich das Problem, dass eine genaue Bestimmung des Bodenaufbaus für das gesamte zu betrachtende Gebiet, z.B. mittels geoakustischer Inversion, sehr aufwendig und für Vorhersagen von Pegeln bei einer Vielzahl von Windparks ungeeignet ist. Daher wurde der Aufbau des Wellenleiters auf der Basis der sogenannten geologischen Voruntersuchung, die bereits in einem sehr frühen Stadium für jeden Pfahl vorliegt, bestimmt. Hierbei wurde die sehr grobe Klassifikation (typischerweise z.B. 12 m Sand über 4 m Ton, usw.) mit Hilfe von Literaturwerten in die benötigten Materialparameter umgerechnet.

In Abbildung 1 sind sowohl der SEL als auch der SPL_{peak} über die Entfernung für einen Empfänger 2 m über dem Boden dargestellt. Zunächst fällt die sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung auf. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung liegen je nach Entfernung für den SEL zwischen 0,5 und 2,5 dB und für den SPL_{peak} zwischen 0,5 und 3,5 dB. Dies beweist, dass der gewählte Ansatz zur Vorhersage von Offshore-Rammschall geeignet ist, vor allem vor dem Hintergrund einer Messunsicherheit von etwa ± 3 dB. Eine Validierung mit einem zweiten Messdatensatz zeigte ebenfalls gute Ergebnisse.

Trotz der hohen Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung stellt sich die Frage nach der Robustheit der Vorhersage. Um dies eingehender zu betrachten werden Parametervariationen zur Sensitivitätsanalyse durch-

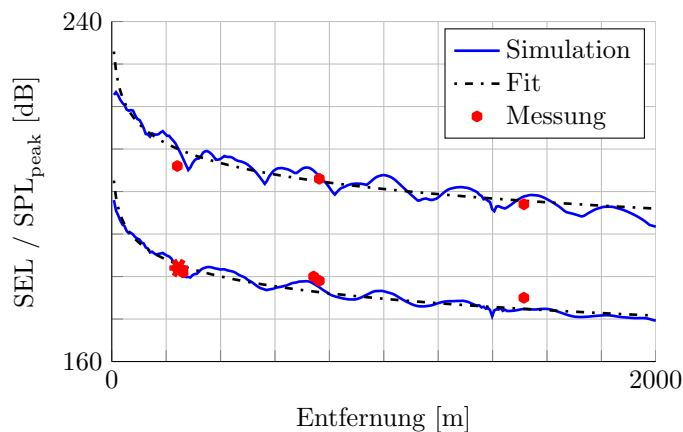


Abbildung 1: SEL (ref. $1\mu\text{Pa}^2/\text{s}$) und SPL_{peak} (ref. $1\mu\text{Pa}$) vs. Entfernung: Vergleich von Simulation und Messung für einen Receiver 2 m über dem Boden

geführt, zunächst am Beispiel einfacher Halbraumböden. Hierzu werden Monte-Carlo-Simulationen (MC) unter Verwendung des Latin-Hypercube-Samplings (LHS) zur Erhöhung der Konvergenzgeschwindigkeit verwendet. Alle Parameter werden um $\pm 10\%$ um ihren nominellen Literaturwert variiert.

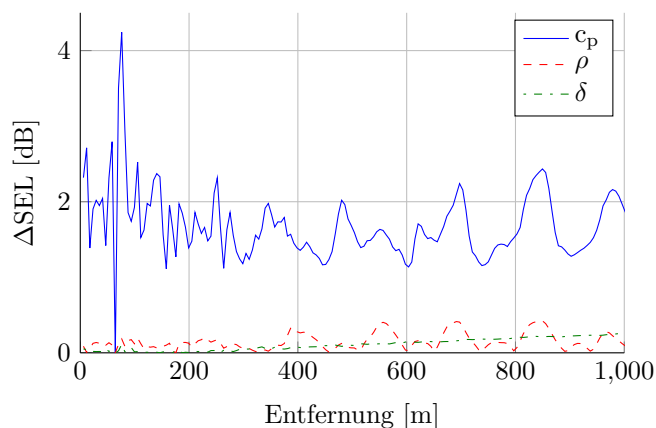


Abbildung 2: Maximale Abweichung des SEL innerhalb einer MC Simulation über die Entfernung, für einen Receiver 2 m über dem Boden

In Abbildung 2 ist die Spanne zwischen maximal und minimal auftretendem SEL dargestellt, wiederum für einen Empfänger 2 m über dem Boden. Der Einfluss der Schallgeschwindigkeit c_p im Boden dominiert hier deutlich gegenüber der Dichte ρ und der Dämpfung δ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine Änderung der Schallgeschwindigkeit sowohl die Impedanz einer Schicht ändert, als auch den kritischen Winkel zu deren Nachbarschichten. Demgegenüber führt eine Änderung der Dichte nur zu einer Impedanzänderung und eine Erhöhung der Dämpfung lediglich zu einer Amplitudenreduktion.

In weiteren Simulationen konnte zusätzlich festgestellt werden, dass der Einfluss der Dämpfung für große Entfernungen dominant wird. Bei Untersuchungen an geschichteten Wellenleitern zeigt sich, dass die Schichtdicke einen noch stärkeren Einfluss hat als die Schallgeschwindigkeit.

Dies verdeutlicht erneut die Notwendigkeit der Verwendung von geschichteten Wellenleitern.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Beitrags wurde ein zweigliedriges numerisches Modell zur Vorhersage von Schalldruckpegeln von Offshore-Rammungen vorgestellt. Mit Hilfe von Messungen im Windpark BARD Offshore I wurde das Modell validiert, wobei sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zeigte. Von entscheidender Bedeutung war hierbei die Berücksichtigung des geschichteten Meeresbodens. Aufgrund der begrenzten Genauigkeit, mit der dieser messtechnisch erfasst werden kann, wurde zusätzlich eine Unsicherheitenanalyse mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Hierbei stellte sich die Schallgeschwindigkeit c_p im Boden als der Faktor heraus, auf den die Schalldruckpegel im Wasser am sensitivsten reagierten.

In einem nächsten Schritt soll die beschriebene Unsicherheitsanalyse systematisch auf verschiedene geschichtete Wellenleiter ausgedehnt werden. Des Weiteren sollten zusätzliche Einflussfaktoren, wie z.B. Schallgeschwindigkeitsprofile im Wasser oder Scheerwellengeschwindigkeiten im Boden variiert und ihr Einfluss untersucht werden.

Danksagung

Die Forschungsaktivitäten im Rahmen des Projekts BORA werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages (FKZ 0325421A) gefördert.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee.* (2013)
- [2] K. Heitmann, T. Lippert, S. Lippert und O. von Estorff: Untersuchung des Einflusses der geometrischen Abmessungen eines Monopiles auf den Schalldruckpegel während einer Offshore-Pfahlrammung. *Fortschritte der Akustik - DAGA 2014* (2014)
- [3] F.B. Jensen, W. A. Kuppermann, M. B. Porter, and H. Schmidt: *Computational Ocean Acoustics.* Springer, Heidelberg (2012)
- [4] T. Lippert and O. von Estorff: On a hybrid model for the prediction of pile driving noise from offshore wind farms. *Acta Acustica united with Acustica* **100** (2014) 244–253
- [5] T. Lippert und S. Lippert: Modeling of pile driving noise by means of wavenumber integration. *Acoustics Australia* **40** (2012) 178–182
- [6] Insitut für technische und angewandte Physik. *Offshore Messkampagne 1 (OMK 1) für das Projekt BORA im Windpark BARD Offshore 1.* (2014)