

Primäre Schallminderung bei Offshore-Pfahlrammungen durch Veränderung des Rammimpulses

Elin Klages, Jonas von Pein, Stephan Lippert, Otto von Estorff

Technische Universität Hamburg, Institut für Modellierung und Berechnung

21073 Hamburg, Deutschland, Email: mub@tuhh.de

Einleitung

Die Kapazität von Offshore-Windenergieparks in Europa hat sich im letzten Jahrzehnt mehr als verzehnfacht. Obwohl Offshore-Windenergie damit einen wichtigen Beitrag zur Energiewende liefert, bedeutet der Bau eines Windparks immer auch einen Eingriff in den Lebensraum zahlreicher Meereslebewesen. Hierbei fällt vor allem die Schallemission beim Bau der Windparks durch das Rammen der primär verwendeten Monopfähle ins Gewicht. Aus diesem Grund sind für Pfahlrammungen in deutschen Gewässern Grenzwerte für die Unterwasserschallpegel in 750 m Entfernung vom Pfahl von 160 dB (Einzelereignispegel) und 190 dB (Spitzenpegel) vorgegeben. Um die vorgeschriebenen Grenzwerte einhalten zu können, werden sekundäre Schallminderungsmaßnahmen, wie z.B. Hüllrohre und Blasenschleier, eingesetzt. Die größer werdenden Abmessungen der in der Entwicklung befindlichen Offshore-Windturbinen verstärken die Notwendigkeit der Weiterentwicklung von wirksamen Schallminderungsmaßnahmen. Bei der Errichtung von Windparks müssen zum Teil bereits mehrere Schallschutzsysteme eingesetzt werden. Neben den bereits vorhandenen, meist sekundären Schallminderungssystemen, geraten daher immer mehr auch primäre Maßnahmen in den Fokus.

Ein Ansatz zur primären Schallminderung ist die Schallabstrahlung bei gleichbleibendem Energieeintrag durch gezielte geometrische und materielle Veränderung des zur Rammung eingesetzten Hammers zu verringern. Ein akustisch guter Hammer könnte in Kombination zu sekundären Schallschutzmaßnahmen eingesetzt werden und bietet damit die Möglichkeit, auch bei höherer Rammenergie, die Grenzwerte einzuhalten.

Dafür ist es zunächst von Interesse, den Zusammenhang zwischen Impuls und Schallabstrahlung zu untersuchen. Anschließend kann der Hammer dann, im Hinblick auf die akustischen Eigenschaften und im Rahmen des technisch Möglichen, angepasst werden.

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst die Schallabstrahlung eines gerammten Pfahls betrachtet. Darauf aufbauend werden Ansätze zur Verringerung des Schalleintrages durch die Veränderung des Rammimpulses vorgestellt und diskutiert.

Numerisches Modell

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse basieren ausschließlich auf Finite-Elemente (FE) Simulationen der Schallentstehung und -ausbreitung. Zum einen

sind Offshore-Pfahlrammungen sehr aufwändig und werden selten zu reinen Testzwecken durchgeführt, sodass Messdaten ein rares Gut darstellen. Zum anderen muss zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Rammimpulse die Möglichkeit gegeben sein diese gezielt vorzugeben, was in einem FE-Modell problemlos möglich ist. Auch wenn im Folgenden vorgestellte Ergebnisse nicht anhand von Messdaten validiert wurden, basiert doch das in diesem Abschnitt vorgestellte FE-Modell auf mit Messdaten validierten Modellen, [1].

Der Einsatz der FE-Methode ermöglicht unter anderem die detaillierte Vorhersage des Schalldrucks auch bis 750 m Entfernung zum Pfahl sowie die Bestimmung der Verformung des Pfahls infolge des Rammschlags. Letztere ist für die Zielsetzung des vorliegenden Beitrags von Interesse, da auf diesem Weg der Einfluss des Rammimpulses auf die Schallanregung untersucht werden kann.

Das hier eingesetzte FE-Modell ist rotationssymmetrisch (2D), der Meeresboden wird dementsprechend als eben angenommen. Obwohl Pfähle auch an Standorten gerammt werden, für die diese Annahme nicht gerechtfertigt ist (siehe [2]), ist die rotationssymmetrische Modellierung für den Zweck des vorliegenden Beitrags ausreichend. Es wird von einem zylindrischen Pfahl mit 70 m Länge, 6,5 m Pfahldurchmesser und 80 mm Wandstärke ausgegangen, welcher zum Zeitpunkt des isoliert betrachteten Rammschlags bereits 35 m in den Meeresboden eingebunden ist. Die Wassertiefe beträgt 30 m. Der Meeresboden wird als geschichtet angenommen. Der Rammimpuls wird über die Pfahlkopfgeschwindigkeit $v_p(t)$ eingebracht und für das vorliegende Manuskript als analytische Funktion approximiert. Weitere Einzelheiten zur Modellierung finden sich in [1].

Zur Evaluierung des Unterwasserschalldrucks werden die zwei folgenden Schallpegel verwendet: Der Einzelschallereignispegel (SEL)

$$\text{SEL} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

sowie der Spitzenpegel (SPL)

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{\max(|p(t)|)}{p_0} \right) \quad [\text{dB}], \quad (2)$$

wobei p_0 sich auf den Referenzdruck von $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ bezieht, $t_0 = t_2 - t_1$ den Referenzzeitraum von üblicherweise 1 s und t_1 die Startzeit des Rammimpulses darstellt.

Schallabstrahlung des gerammten Pfahls

Jeder Hammerschlag bewirkt eine Stauchung des Pfahlkopfes, die sich als quasilongitudinale Welle im Pfahl fortsetzt. Am Pfahlfuß wird die Welle reflektiert und wandert wieder nach oben, wo erneut eine Reflexion stattfindet. Dieser Vorgang wiederholt sich bis die Welle alle Energie an das Wasser und den Meeresboden abgegeben hat bzw. dissipiert ist. Die radiale Verformung der Quasilongitudinalwelle sorgt für die Anregung von Schallwellen in Wasser und Boden. Die sich im Meeresboden ausbreitenden Wellen wandern zum Teil in das Wasser und tragen somit auch zu Unterwasserschallpegeln bei. Mit der Entfernung zum Pfahl verringern sich die Schallpegel aufgrund der verringerten Schallintensität sowie von Verlusten. Interferenzen von an der Wasseroberfläche und am Meeresboden reflektierten Schallwellen können zu lokalen Anstiegen der Schallpegel führen, generell nehmen die Schallpegel allerdings ab [3].

Anstelle der Schallpegel sollen im Folgenden die Frequenzanteile des Unterwasserschalldrucks betrachtet werden. Hierfür wurde das oben eingeführte Ramm-szenario simuliert. Der Rammimpuls wurde als Gauß-Kurve approximiert und so skaliert, dass die Rammenergie 2000 kJ beträgt. Zur Veranschaulichung ist das normierte Frequenzspektrum des Drucks in 750 m Entfernung zum Pfahl in Abbildung 1 dargestellt. Besonders im Vergleich zum normierten Spektrum der Anregung, ebenfalls dargestellt in Abbildung 1, wird deutlich, dass einige Frequenzen wesentlich stärker übertragen werden.

Betrachtet man nun die Dehnwelleneigenfrequenzen eines einseitig eingespannten Stabes, der die gleiche Länge und Materialparameter wie der Pfahl aufweist, fällt auf, dass die Spitzen im Frequenzspektrum auf diesen Frequenzen oder zumindest in der Nähe liegen. Die Eigenfrequenzen sind im Frequenzspektrum in Abbildung 1 markiert. Diese Dominanz der Dehnwelleneigenfrequenzen wurde auch in Messdaten, für unterschiedliche Pfähle und Standorte, in [4] beobachtet.

Im normierten Frequenzspektrum der Beschleunigung an der Außenwand des Pfahls, siehe Abbildung 2, zeigt sich eine vergleichbare Charakteristik in der axialen Beschleunigung.

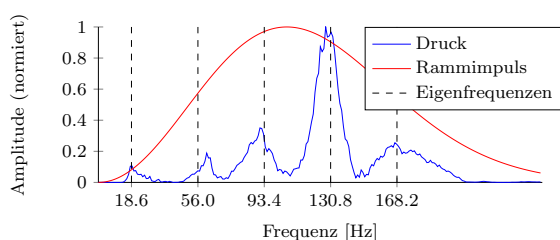


Abbildung 1: Das Frequenzspektrum des akustischen Drucks 2 m über dem Meeresboden in 750 m Entfernung zum Pfahl.

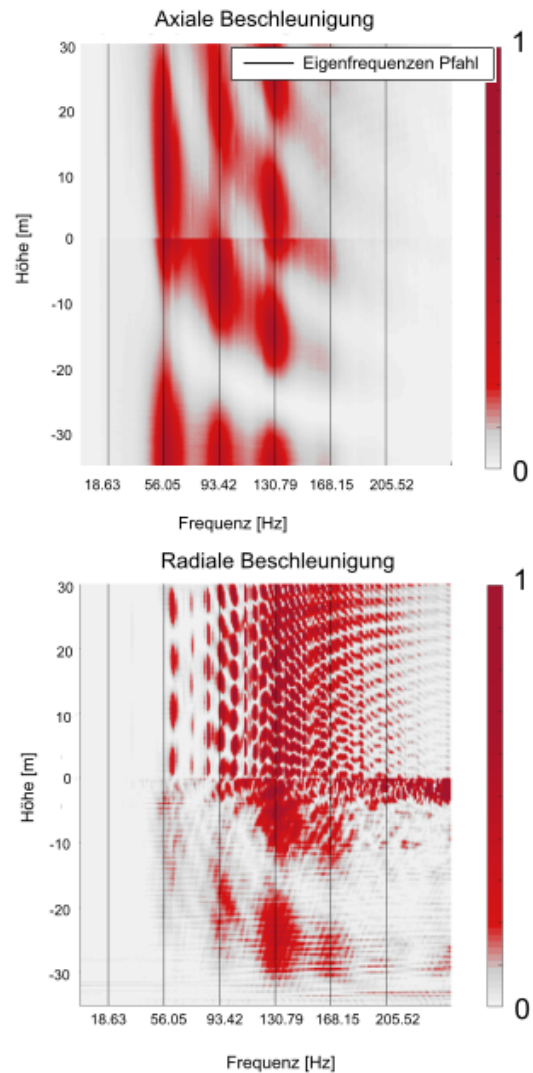


Abbildung 2: Das normierte Frequenzspektrum der axialen und radialen Beschleunigung an der Außenwand des Pfahls aufgetragen über die Höhe des Pfahls. Die Höhe $h = 0$ befindet sich am Meeresboden. Darunter ist das Spektrum der Beschleunigung des eingebundenen Pfahlteils gezeigt. Zwischen $h = 0$ und $h = 30$ m ist das Spektrum der Pfahlbeschleunigung in der Wassersäule dargestellt. Die Amplituden der jeweiligen Frequenzanteile sind bezogen auf die axiale oder radiale Beschleunigung und getrennt für den Pfahl im Meeresboden bzw. im Wasser normiert.

Da es sich hier um longitudinale Eigenfrequenzen handelt ist dieser Zusammenhang nicht überraschend. Interessant ist allerdings, dass sich eine ähnliche Verteilung auch in der radialen Beschleunigung im eingebunden Teil des Pfahls beobachten lässt. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass die Eigenfrequenzen um so dominanter sind, wenn Schallschutz eingesetzt wird, die direkte Ausbreitung der Schallwellen im Wasser also vermindert wird und die Bodenwellen damit an Bedeutung gewinnen. Die aufgeführten Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Anregung der Eigenfrequenzen eine Einflussgröße sein könnte, über die die Schallabstrahlung des Pfahls gezielt verändert werden könnte.

Modifikation der Impulsdauer

Unter der Annahme, dass gerade die radiale Beschleunigung der Pfahlaußenwand ausschlaggebend für die Schallabstrahlung ist, ist es naheliegend, dass bei gleichem Energieeintrag ein lang gezogener Rammimpuls leiser ist als ein kurzer Impuls. Dieser Zusammenhang soll in diesem Abschnitt anhand des oben eingeführten Szenarios und sechs Rammimpulsen unterschiedlicher Länge näher betrachtet werden. Der Rammimpuls wird dafür über die durch den Rammvorgang induzierte axiale Pfahlkopfgeschwindigkeit $v_p(t)$ und diese als Gauss-Kurve

$$v_p(t) = -a e^{b(t-t_0)^2} \quad (3)$$

modelliert. Über den Faktor b kann die Länge des Impulses gezielt variiert werden. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird der Rammimpuls jeweils über den Faktor a so skaliert, dass der Energieeintrag 2000 kJ beträgt. Die Rammenergie E wird hierfür über

$$E = \int_0^T v_p(t) F_p(t) dt = A_p Z_s \int_0^T v_p^2(t) dt, \quad (4)$$

berechnet. Hier bezieht sich T auf die Impulslänge, F_p auf die Kraft die am Pfahlkopf wirkt, A_p auf die Querschnittsfläche des Pfahls und Z_s auf die Schallkennimpedanz von Stahl. Eine Darstellung der so vorgegebenen Rammimpulse findet sich in Abbildung 3(a).

Anhand der Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 3(b), lässt sich erkennen, dass die Schallpegel über die Länge des Impulses monoton fallen. Allerdings wird auch ersichtlich, dass kein lineares Verhältnis besteht. Innerhalb der sechs verschiedenen Impulse gibt es jeweils drei Kombinationen, bei denen sich die Impulsdauer verdoppelt.

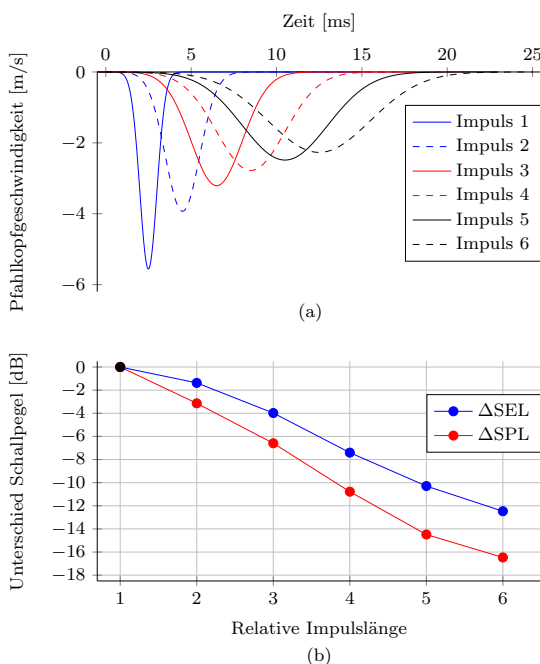


Abbildung 3: (a) Sechs Rammimpulse unterschiedlicher Dauer aber gleicher Energie. (b) Mittelwert der Verringerung der Schallpegel 2 m über dem Meeresboden und in 700 bis 800 m Entfernung zum Pfahl.

Die Kombinationen und die dazugehörige Schallreduktion finden sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Verdopplung der Impulsdauer.

Vergleich Rammimpuls	Δ SEL
1 & 2	1.37 dB
2 & 4	6.03 dB
3 & 6	8.49 dB

Diese drei Beispiele zeigen, dass der Verringerung der Schallabstrahlung nicht direkt proportional zur Impulsdauer ist, sondern im Gegenteil sogar sehr unterschiedlich ausfällt. Bemerkenswert ist, dass dies nicht der Fall ist, obwohl die Rammimpulse prinzipiell die gleiche Rammcharakteristik aufweisen.

Modifikation des Frequenzspektrums

Aufbauend auf dem zuvor dargestellten Zusammenhang zwischen Dehnwelleneigenfrequenzen des Pfahls und den dominanten Frequenzen im Frequenzspektrum des Unterwasserschalldrucks soll im Folgenden die Möglichkeit zur Verringerung der Schallpegel durch eine gezielte Modifikation des Frequenzspektrums diskutiert werden. Dafür wurden Simulationen mit zwei verschiedenen Rammimpulsen durchgeführt die sich dahingehend unterscheiden, dass die Eigenfrequenzen gezielt im Frequenzspektrum auftauchen bzw. umgangen werden.

Für den hier beispielhaft betrachteten Pfahl, betragen die ersten fünf Dehnwelleneigenfrequenzen 18.6, 56.0, 93.4, 130.8 und 168.1 Hz. Der erste Rammimpuls, im Folgenden als Impuls A bezeichnet, ist eine Superposition aus zwei harmonischen Wellen, deren Frequenz, $f_1 = 74.6$ Hz und $f_2 = 149.2$ Hz, genau zwischen jeweils zwei Eigenfrequenzen liegt. Die Periodendauer der gewählten harmonischen Funktionen haben ein gemeinsames Vielfaches sodass, eine Superposition möglich ist, ohne dass unphysikalische Sprünge in der Definition des Impulses auftauchen. Die Pfahlkopfbeschleunigung ist dementsprechend definiert über

$$a_A(t) = \sin(2\pi 74.6 \text{ Hz } t) + \sin(2\pi 149.2 \text{ Hz } t) \quad (5)$$

mit $t \in [0, 1/74.6 \text{ s}]$.

Der Verlauf ist in Abbildung 4 gezeigt. Der zweite Rammimpuls, im Folgenden bezeichnet mit Impuls B, wurde entworfen um gezielt Eigenfrequenzen anzuregen. Wie zuvor erläutert gilt es auch hier Unstetigkeiten im Rammimpuls auszuschließen, weshalb Eigenfrequenzen die ein gemeinsames Vielfaches besitzen ausgewählt wurden. Die Definition der Pfahlkopfbeschleunigung für Impuls B lautet

$$a_B(t) = \sin(2\pi 56.0 \text{ Hz } t) + \sin(2\pi 168.1 \text{ Hz } t), \quad (6)$$

mit $t \in [0, 1/56.0 \text{ s}]$.

Um die Ergebnisse beider Szenarien vergleichen zu können, wurden beide Impulse so skaliert, dass sie einen Energieeintrag von 2000 kJ in den Pfahl bewirken (siehe Gleichung (4)). Die Schallpegel, die jeweils aus den

vorgegebenen Impulsen A und B resultieren, sind in Abbildung 5(a) gezeigt.

Aus den Schallpegeln wird ersichtlich, dass der Pfahl nach einer Anregung mit Impuls A mehr Schall abstrahlt als bei einer Anregung mit Impuls B. Dies entspricht nicht der Erwartung, dass das Umgehen der Eigenfrequenzen (Impuls A) zu einer verringerten Vibration im Pfahl führt. An dieser Stelle ist allerdings auch zu beachten, dass die Pfahlkopfbeschleunigung von Impuls A gegenüber Impuls B deutlich höhere Werte annimmt, was wiederum höhere Schallpegel erklären könnte. Dennoch zeigen auch die Frequenzspektren des Unterwasserschalldrucks 2 m über dem Meeresboden und in 750 m Entfernung zum Pfahl, dargestellt in Abbildung 5(b)-(c), dass der erhoffte Effekt nicht eingetreten ist.

Trotz gezielter Anregung von Frequenzen mit maximalem Abstand zu den Eigenfrequenzen weist das dargestellte Spektrum in Abbildung 5(b) eine ähnliche Charakteristik zu dem anfänglich dargestellten Spektrum in Abbildung 1 auf: Die besonders ausgeprägten Frequenzen befinden sich nah der Dehnewelleneigenfrequenzen.

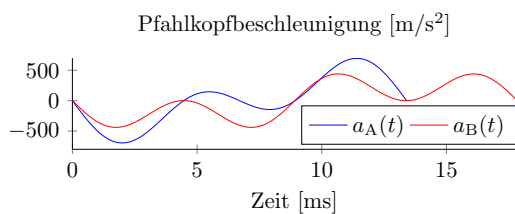


Abbildung 4: Pfahlkopfbeschleunigungen zu Impuls A und B.

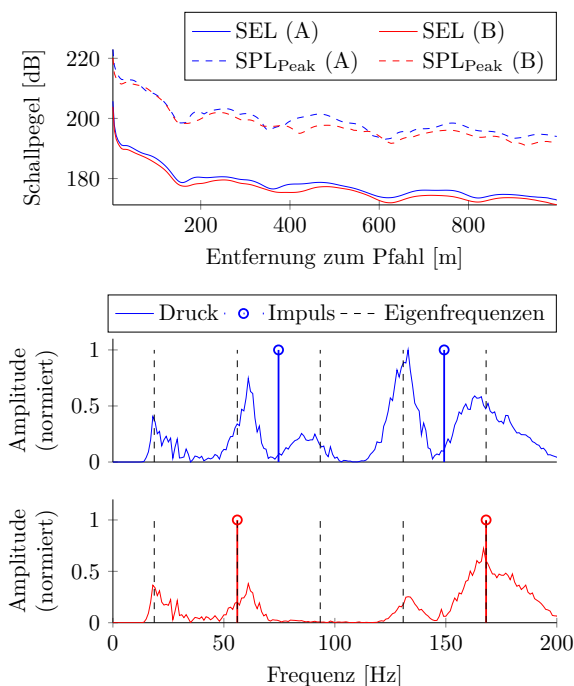


Abbildung 5: Schallpegel und Frequenzspektren des Schalldrucks infolge der Rammimpulse A und B.

Der Vergleich zu dem Frequenzspektrum des Schalldrucks hervorgerufen durch Impuls B, dargestellt in Abbildung 5(c), zeigt, dass sogar mehr Eigenfrequenzen angeregt wurden.

Die vorgestellten Ergebnisse basierend auf rein theoretisch konstruierten Impulsen, deuten darauf hin, dass es nicht möglich ist den Einfluss der dominanten Eigenfrequenzen über den Rammimpuls zu verringern um damit die Schallabstrahlung zu reduzieren.

Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag betrachtet den Pfahl als Schallquelle sowie Möglichkeiten zur Verringerung der Schallabstrahlung durch eine Veränderung des Rammimpulses. In diesem Zusammenhang wurde sowohl der Einfluss der Länge des Impulses sowie dessen Frequenzanteile betrachtet. Eine Verlängerung des Rammimpulses reduziert wie erwartet die Schallpegel, der Zusammenhang zwischen Schallreduktion und Impulslänge weist aber kein lineares Verhalten auf. Die Veränderung der Frequenzanteile des Rammimpulses konnte im vorgestellten Fall nicht den erhofften Effekt, das Umgehen der Eigenmoden, erzielen. Hier konnte der gegenteilige Effekt beobachtet werden. Obwohl die Eigenfrequenzen in der Anregung umgangen wurden, waren sie im Frequenzspektrum des Unterwasserschalldrucks dominant.

Aufbauend auf den Ergebnissen gilt es weitere Einflussfaktoren, abgesehen von der Länge des Impulses, auf die Schallpegel zu bestimmen. Als darauffolgender Schritt soll untersucht werden wie der zur Rammung eingesetzte Hammer dahingehend angepasst werden kann.

Danksagung

Die vorliegenden Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Projektes SilentHammer und werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert (FKZ 0324262A).

Literatur

- [1] K. Heitmann. Vorhersage des Unterwasserschalls bei Offshore-Rammarbeiten unter Berücksichtigung von Schallminderungsmaßnahmen. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2016.
- [2] J. von Pein, E. Klages, S. Lippert, und O. von Estorff. Untersuchung zur Approximation der Bathymetrie bei der Berechnung der Rammerschallausbreitung in 3D. Jahrestagung für Akustik (DAGA), Rostock, Deutschland, 2019.
- [3] T. Lippert. Robust numerical prediction of offshore pile driving noise over long ranges. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2016.
- [4] K. Siegl. Zur Pfahldynamik von gerammten Großbohrpfählen und der daraus resultierenden Wellenausbreitung in Wasser und im Meeresboden. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2016.