

# Formoptimierung eines Impulshammers zur Schallminderung bei Offshore-Pfahlrammungen

Elin Klages, Stephan Lippert, Otto von Estorff

Technische Universität Hamburg, Institut für Modellierung und Berechnung

Denickestr. 17, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: mub@tuhh.de

## Einleitung

Die Zahl der Offshore-Windparks steigt weltweit rasant. Dabei bedeutet die Installation eines neuen Windparks immer auch einen Eingriff in den Lebensraum zahlreicher Meereslebewesen. Ein wesentlicher Faktor sind die häufig sehr hohen Schallemissionen während der Installation die mit der Verwendung von Pfählen als Fundament einhergehen. Diese werden mit einem Rammhammer in den Meeresboden getrieben, wobei durch jeden Hammerschlag im Pfahl eine Quasilongitudinalwelle angeregt wird, die in das umliegende Wasser sowie den Meeresboden Schall abstrahlt. Zum Schutz der Meereslebewesen wurden in Deutschland, sowie zahlreichen anderen Ländern, Grenzwerte für die resultierenden Unterwasserschallpegel eingeführt. Um diese einzuhalten, werden üblicherweise Schallminderungssysteme verwendet, welche die Schallausbreitung im Wasser reduzieren. Allerdings ist absehbar, dass die verwendeten Schallschutzsysteme in Zukunft nicht mehr ausreichen werden, da zusammen mit der Leistung der Turbinen auch die Pfahldurchmesser, die aufgebrachte Energie zur Rammung und damit die Schallemissionen zunehmen.

Ein derzeit verfolgter alternativer Ansatz besteht darin über ein verändertes Hammerdesign den Rammschlag so zu verändern, dass die Schallabstrahlung gesenkt wird. Hierbei wird sich zunutze gemacht, dass die resultierenden Schallpegel nicht nur von der verwendeten Rammenergie sondern auch wesentlich von der Rammimpulscharakteristik abhängen [1]. Besonders ein langer glatter Kraftverlauf führt zu deutlich geringeren Schallemissionen. Dieser Ansatz findet bereits Verwendung, so zielt z.B. das Hammer-Design von Blue Piling auf eine Verlängerung des Impulses ab [2].

In vorliegendem Beitrag werden Möglichkeiten zur Schallreduzierung über das gezielte Design der Geometrie der Schlagkomponenten vorgestellt. Dabei werden die beiden wesentlichen Komponenten eines Rammhammers, der Fallkörper und die Schlaghaube, berücksichtigt. Hierfür wird im nächsten Abschnitt zunächst auf die Rahmenbedingungen der hier verwendeten Optimierung eingegangen. Die Ergebnisse der Optimierung sowie deren Analyse finden sich im darauf folgenden Abschnitt.

## Formoptimierung des Hammers

Für die Optimierung der Form gilt es zunächst die Zielfunktion abhängig von der Form des Hammers sowie die Nebenbedingungen zu definieren. Da hier keine analytische Zielfunktion verwendet werden kann, wird stattdes-

sen in jedem Schritt eine Finite-Elemente (FE) Simulation gestartet. Für die Abhängigkeit von der Form ist es notwendig für diese eine Parametrisierung zu definieren. Sind alle oben genannten Bedingungen gegeben, kann die Zielfunktion in einen Optimierungsalgorithmus, hier Partikelschwarmoptimierung, eingebettet werden.

## Zielfunktion

Das Ziel der Optimierung ist die Reduktion der Schallemission. Diese wird hier über den Einzelschallereignispegel (SEL) bestimmt, der wie folgt definiert ist:

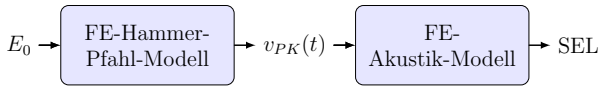
$$\text{SEL} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Dabei gibt  $p(t)$  den akustischen Druck im Wasser,  $p_0$  den Referenzdruck für Unterwasserschall von  $1 \mu\text{Pa}$  und  $t_0$  die Bezugszeit von 1 s an. Die Integrationsgrenzen  $t_1$  und  $t_2$  beschreiben den Beginn sowie das Ende des Schallereignisses. Als Kriterium wird hier der SEL in 10 m Entfernung vom Pfahl gemittelt über die Wassertiefe und  $t_2 - t_1 = 100 \text{ ms}$  verwendet. Der SEL wird zusätzlich mit dem Wirkungsgrad des Hammers, hier definiert als  $\eta = \frac{E_p}{E_0}$ , wobei  $E_0$  die Rammenergie und  $E_p$  die Energie die vom Hammer auf den Pfahl übertragen wird bezeichnet, korrigiert. Zusätzlich werden Strafterme  $g(\bullet)$  für die Verletzung von Optimierungsnebenbedingungen eingeführt. Diese beziehen sich auf die Massen beider Hammerkomponenten  $m_{\text{FK}}, m_{\text{SH}}$ , der maximalen Spannung bezogen auf beide Komponenten  $\max(\sigma)$  und die Rammbarkeit des Pfahls. Letztere wird im Rahmen dieses Beitrags über das Maximum der Pfahlkopfgeschwindigkeit  $v_{\text{PK}}$  abgeschätzt. Die Zielfunktion lautet demnach:

$$\min \{ \text{SEL} - 10 \log_{10}(\eta) + g(\eta, m_{\text{FK}}, m_{\text{SH}}, \sigma, \hat{v}) \}. \quad (2)$$

Jede der Größen, die in Gleichung (2) auftauchen, ist abhängig von der Form des Hammers, definiert durch die Optimierungsparameter  $\theta$ . Explizit kann kein Zusammenhang zwischen der Hammerform  $\theta$  und dem Wert der Zielfunktion formuliert werden. Stattdessen wurde für die in diesem Beitrag vorgestellten Optimierungsläufe auf zwei FE-Modelle, implementiert innerhalb des Programmpaketes Abaqus, zurückgegriffen. Das erste Modell dient dazu den Hammerschlag zu simulieren und ist damit abhängig von der variablen Hammerform. Die Vernetzung erfolgt automatisch mit einer ungefähren Elementgröße von 5 cm. Letztere wird an das zweite Modell übergeben, welches der Simulation der Schallwellenausbreitung dient. Der zuvor beschriebene Zusammenhang

ist in Abbildung 1 dargestellt. Die verwendeten Modelle basieren auf Modellen, welche im Rahmen des Projektes BORA entwickelt wurden. Weitere Informationen zur Modellierung finden sich in [3].



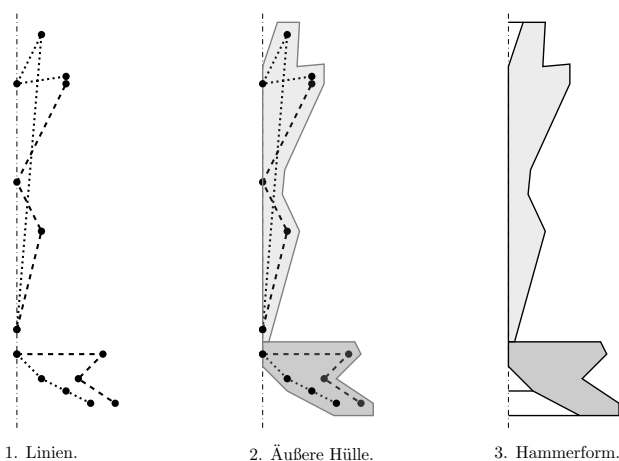
**Abbildung 1:** Modellierung von Unterwasserschall infolge eines Hammerschlags zur Pfahlrammung.

### Parametrisierung der Form

Bei der Wahl der Parametrisierung gilt es zum einen die Anzahl der Parameter  $\theta_i$  möglichst gering zu halten, da mit dieser auch die Komplexität der Optimierung zunimmt. Zum anderen gilt es eine stabile Beschreibung der Form zu definieren, d.h. Überschneidungen der Außenlinien zu vermeiden. Gleichzeitig ist es aber auch erstrebenswert die Form des Hammers so frei wie möglich zu lassen, was wiederum zu einer hohen Anzahl an Parametern und fehlerhaft definierten Formen führen kann.

Die genannten Schwierigkeiten wurden durch eine mehrteilige Optimierung mit unterschiedlichen Parametrisierungen angegangen. Die erste Phase diente der möglichst freien Optimierung, um akustisch gute Grundformen zu bestimmen. Für die zweite und dritte Phase wurden ausgewählte Formen der vorherigen Phasen durch eine vereinfachte Parametrisierungen nachgebildet, welche dann für weitere Optimierungsläufe verwendet wurde.

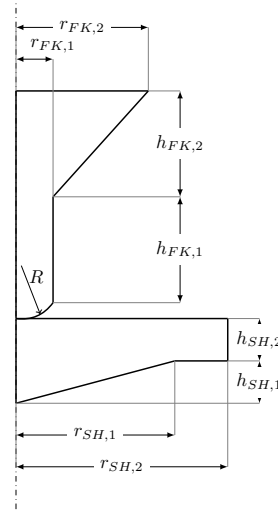
Die Parametrisierung für Phase I wurde über die Außenhülle von im Raum verlaufende Linien realisiert. Eine Darstellung des Prinzips dieser Parametrisierung findet sich in Abbildung 2. Die Parameter  $\theta$  sind in diesem Fall die Koordinaten der Eckpunkte. Diese Methode zur Parametrisierung möglichst vielfältiger Formen wurde hier gezielt für die Optimierung des Hammers entworfen.



**Abbildung 2:** Beispielhafte Parametrisierung von Fallkörper und Schlaghaube über die Außenhülle von sich schneidenden Linien. Die Darstellung ist rotationssymmetrisch.

Die vereinfachten Parametrisierungen wurden über ein Polygon realisiert. Nur die Kontaktfläche wurde, zur Integration der Balligkeit, über eine Rundung definiert. Die

Balligkeit ist wichtig, damit der Kontaktpunkt bei der Rammung zentrisch liegt. Ein Beispiel einer solchen vereinfachten Parametrisierung findet sich in Abbildung 3.



**Abbildung 3:** Beispielhafte Parametrisierung von Fallkörper und Schlaghaube durch Radien und Höhen sowie der Balligkeit (überhöht dargestellt).

### Partikelschwarmoptimierung

Die Optimierung der Hammerform hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften gestaltet sich als schwierig, da der Einfluss der Optimierungsparameter miteinander gekoppelt ist und weder eine analytische noch eine konvexe Zielfunktion vorliegt, also mehrere lokale Minima existieren. Ein bekannter globaler Optimierungsalgorithmus, der auch im Bereich der Formoptimierung schon verwendet wurde, ist die Partikelschwarmoptimierung [4]. Diese basiert diese auf  $n$  Partikeln, die sich als Schwarm in jedem Optimierungsschritt im Suchraum abhängig von den Zielwerten der Partikel im aktuellen sowie vorherigen Optimierungsschritten zu einer anderen Position bewegen, wobei die Bewegung des Partikels  $i$  zum Zeitpunkt  $k+1$  wie folgt definiert ist [5]:

$$\theta_{k+1}^i = \theta_k^i + v_{k+1}^i, \quad (3)$$

$$v_{k+1}^i = w v_k^i + c_1 r_1 (\theta_{\text{best}}^i - \theta_k^i) + c_2 r_2 (\theta_k^{\text{best}} - \theta_k^i). \quad (4)$$

Für die im Rahmen dieses Beitrags durchgeführten Optimierungsläufe wurden die Koeffizienten  $w = 0.8$  und  $c_1, c_2 = 2$  verwendet,  $r_1$  und  $r_2$  entsprechen Zufallszahlen zwischen 0 und 1 und  $\theta_k^{\text{best}}$  sowie  $\theta_{\text{best}}^i$  stellen die beste Position im Schwarm zum aktuellen Zeitschritt  $k$  sowie des Partikels  $i$  zu allen bisherigen Zeitschritten dar. Es wurde zusätzlich eine 5%-Wahrscheinlichkeit eingebaut, dass der jeweilige Partikel sich mit einer zufälligen Geschwindigkeit bewegt [4].

Bezogen auf die Optimierung der Hammerform bedeutet das beschriebene Vorgehen, dass  $n$  Hammerdesigns  $\theta^i$  mit  $i = 1, \dots, n$  in jedem Optimierungsschritt betrachtet werden. Jedem Hammerdesign  $\theta^i$  wird ein Zielwert nach Gleichung (2) zugeordnet. Bewegt ein Hammerdesign sich im Parameterraum, ändert sich das Design und damit der Zielwert.

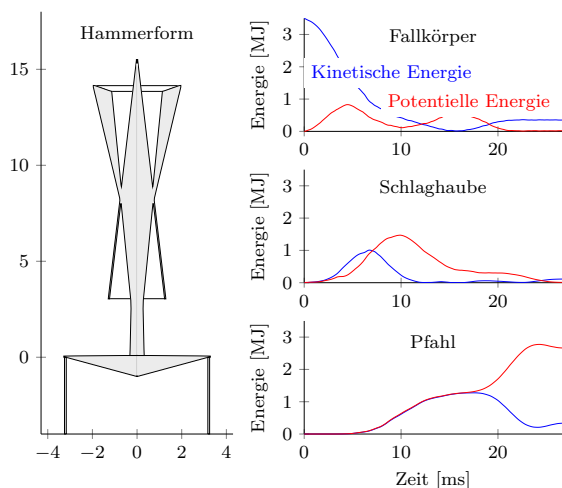
## Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der drei Phasen der Optimierung vorgestellt und diskutiert.

### Phase I - Allgemeine Parametrisierung

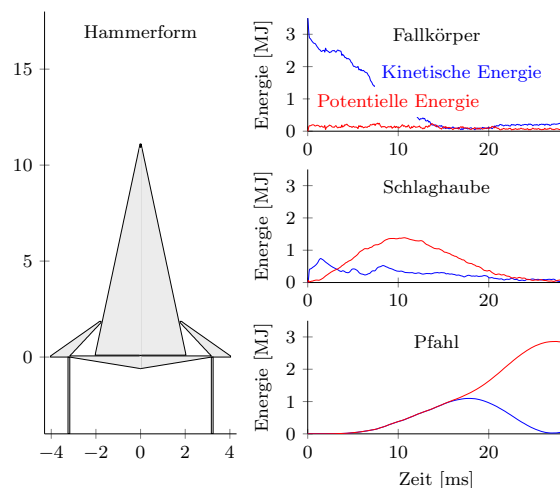
Die Ergebnisse der ersten Optimierungsläufe, mithilfe der Parametrisierung dargestellt in Abbildung 3, zeigen sehr unterschiedliche Formen, mit ähnlichen akustischen Eigenschaften. Es wurden zwei Ergebnisse zur weiteren Untersuchung ausgewählt, welche im Folgenden vorgestellt werden.

Die erste Hammerform, dargestellt in Abbildung 4, zeigt einen zunächst schmalen Fallkörper der nach oben hin an Volumen zunimmt und eine Schlaghaube welche die meiste Masse im Inneren des Pfahls hat. Die geringe Steifigkeit im unteren Bereich des Fallkörpers führt zu einer Kompression in diesem Bereich, d.h. ein Teil der kinetischen Energie des Fallkörpers wird zunächst in potentielle Energie umgewandelt, bevor sie an die Schlaghaube abgegeben wird. An den, ebenfalls in Abbildung 4 dargestellten, Energieverläufen lässt sich aber auch erkennen, dass der Großteil der Energie in der Schlaghaube gespeichert wird. Im Gegensatz dazu zeigt die zwei-



**Abbildung 4:** Ein Ergebnis der Optimierung der Hammerform aus Phase I: (SEL: 187,8 dB,  $\eta$ : 0,86,  $\hat{v}_{PK}$ : 2,68 m/s).

te Form, dargestellt in Abbildung 5, einen Hammer mit einem sehr steifen Fallkörper, bei dem sich die Verformung fast ausschließlich auf die Schlaghaube begrenzt. Der SEL von 184,1 dB ist in diesem Fall sogar geringer. Hier muss allerdings beachtet werden, dass die Rammbarkeit evtl. beeinträchtigt ist, da auch die Pfahlkopfgeschwindigkeitsspitze  $\hat{v}_{PK}$  geringer ausfällt. So sehr sich die beiden Formen voneinander unterscheiden fällt doch auf, dass in beiden Fällen die Schlaghaube in den Pfahl hineinragt. Aufbauend auf den vorgestellten Ergebnissen wurden erneute Optimierungsläufe mit vereinfachten Parametrisierungen nach Abbildung 3 durchgeführt (Phase II). Für die Vereinfachung der Formen wurde an dieser Stelle zum ersten Mal die Möglichkeit der Fertigung berücksichtigt. So wurden für die erste Grundform, basierend auf dem Ergebnis dargestellt in Abbildung 4, der

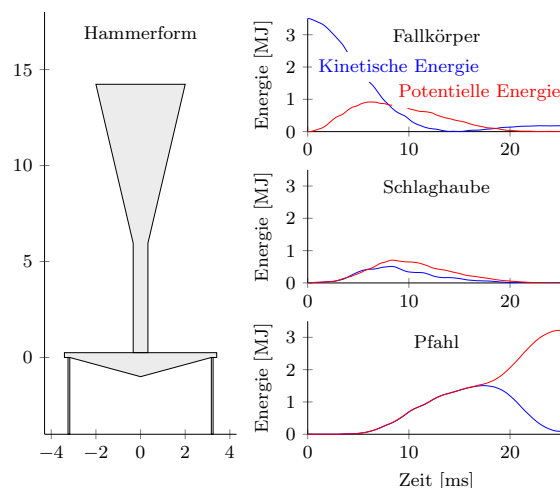


**Abbildung 5:** Ein Ergebnis der Optimierung der Hammerform aus Phase I: (SEL: 184,1 dB,  $\eta$ : 0,83,  $\hat{v}_{PK}$ : 2,03 m/s).

schmale Überhang und die oberen Aushöhlungen nicht übernommen. Für die zweite Grundform, basierend auf dem Ergebnis dargestellt in Abbildung 5, wurde zunächst der obere Teil der Schlaghaube ignoriert, d.h. für Phase II der Optimierung wurden für beide Grundformen die Gleiche grundlegende Geometrie der Schlaghaube angenommen. Die Ergebnisse sind im folgenden Teil des Beitrags dargestellt.

### Phase II - Vereinfachte Parametrisierung

Die Optimierung der vereinfachten Form war für die erste Grundform sehr erfolgreich. Hier konnte die Schallminderung sowie die Effizienz sogar verbessert werden, wobei die Komplexität der Form, dargestellt in Abbildung 6, deutlich reduziert wurde. Im Vergleich zu den

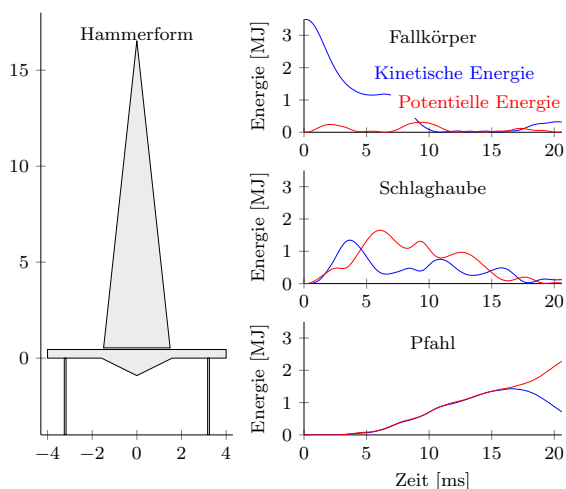


**Abbildung 6:** Ergebnis der Optimierung der Hammerform aus Phase II: (SEL: 187,2 dB,  $\eta$ : 0,95,  $\hat{v}_{PK}$ : 2,65 m/s) basierend auf der Grundform abgeleitet aus Abbildung 4.

Ergebnissen der ersten Phase der Optimierung zeigt sich hier, dass die Schlaghaube nun weniger gestaucht wird. Stattdessen speichert der Fallkörper einen höheren Anteil der Energie zwischen. Diese Beobachtung ist ver-

mutlich durch die vordefinierte Balligkeit am Fallkörper zurückzuführen, welche erst bei der vereinfachten Parametrisierung vorgegeben wurde. Diese federt auch ein, senkt also die Steifigkeit des Fallkörpers lokal und führt möglicherweise dazu, dass die Optimierung sich in Richtung einer steiferen Schlaghaube entwickelt.

Für die zweite Grundform, basierend auf dem Ergebnis dargestellt in Abbildung 5, konnte ein ähnlicher Erfolg verzeichnet werden. Das Optimierungsergebnis ist in Abbildung 7, dargestellt. Im Vergleich zum vorherigen Ergebnis zeigt sich aber ein geringerer Wirkungsgrad sowie eine geringere maximale Pfahlkopfgeschwindigkeit.



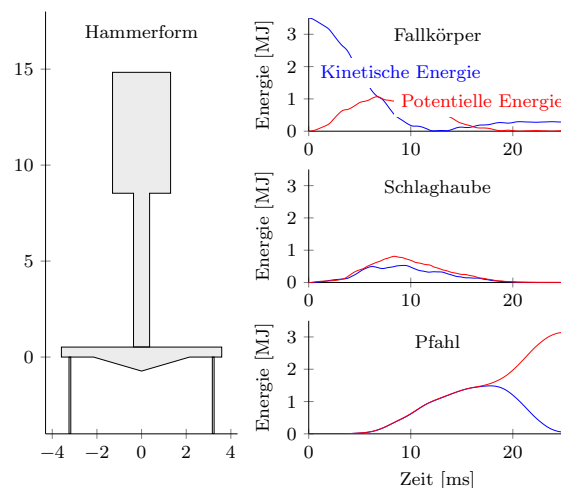
**Abbildung 7:** Ergebnis der Optimierung der Hammerform aus Phase II: (SEL: 186,6 dB,  $\eta$ : 0,86,  $\hat{v}_{PK}$ : 2,51 m/s) basierend auf der Grundform abgeleitet aus Abbildung 5.

### Phase III - Vereinfachte Parametrisierung

Aufbauend auf dem Erfolg in Phase II für die erste Grundform wurde diese weiter vereinfacht. Im Hinblick auf die Fertigung wurde der konische Teil des Fallkörpers durch einen zylindrischen Teil ersetzt. Das Optimierungsergebnis dieser weiter vereinfachten Parametrisierung ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Form des Hammers unterscheidet sich nun hinsichtlich ihrer Komplexität nicht mehr von bereits existierenden Hämmern, wobei der SEL weiterhin einen geringen Wert aufweist.

### Fazit und Ausblick

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Fragestellung der Optimierung der Form eines Rammhammers zur Minderung der Schallemissionen bei Offshore-Pfahlrammungen. Gezeigt hat sich vor allem, dass trotz konstanter Rammenergie und betrachteten Einschränkungen bezüglich Rammbarkeit, Masse, Dimensionen des Hammers, Spannung im Material sowie Möglichkeiten zur Fertigung erhebliche Unterschiede in den Schallpegeln durch eine Veränderung der Form des Hammers erreicht werden können. Hier ist wichtig zu beachten, dass die dargestellten Schallpegel sich auf eine Entfernung zum Pfahl von nur 10 m beziehen. Durch die grobe Voruntersuchung mit einer Parametrisierung, die sehr unterschiedliche Formen zulässt, hat sich auch



**Abbildung 8:** Ergebnis der Optimierung der Hammerform aus Phase III: (SEL: 185,4 dB,  $\eta$ : 0,91,  $\hat{v}_{PK}$ : 2,5 m/s) basierend auf der Vereinfachung der Form in Abbildung 6.

die Schlaghaube als möglicher Energiespeicher erwiesen. Durch die genauere Untersuchung der akustisch guten Grundformen konnte die Komplexität der Formen erheblich reduziert werden ohne Abstriche in der Schallminderung zu machen.

### Danksagung

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

### Literatur

- [1] Elin Klages, Jonas von Pein, Stephan Lippert, Otto von Estorff, Primäre Schallminderung bei Offshore-Pfahlrammungen durch Veränderung des Rammimpulses. DAGA 2019 Proceedings, 2019, pp. 787-790
- [2] Koschinski, S.; Lüdemann, K., Quieting technologies for offshore pile driving. Progress in Marine Conservation in Europe 2015, 2015, pp. 217-220
- [3] Heitmann, K.; Mallapur, S.; Lippert, T.; Ruhnu, M., Lippert, S.; von Estorff, O. Numerical determination of equivalent damping parameters for a finite element model to predict the underwater noise due to offshore pile driving. Proceedings of Euronoise 2015, Maastricht, Netherlands, 2015, pp. 605-610.
- [4] Fourie, P. C.; Groenwold, A. The particle swarm optimization algorithm in size and shape optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization 23, no. 4, 2002, pp. 259-267.
- [5] Kennedy, J.; Eberhart, R. Particle swarm optimization (PSO). Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995, pp. 1942-1948.