

# Vorhersage des Unterwasserschalls bei Offshore-Rammarbeiten unter Berücksichtigung von Schallminderungsmaßnahmen

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor Ingenieur  
genehmigte Dissertation

von  
Kristof Heitmann

aus  
Mölln

2017

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Möser

Tag der mündlichen Prüfung: 11.11.2016

Schriftenreihe des Instituts für  
Modellierung und Berechnung der  
Technischen Universität Hamburg-Harburg

Band 25

**Kristof Heitmann**

**Vorhersage des Unterwasserschalls bei  
Offshore-Rammarbeiten unter Berücksichtigung  
von Schallminderungsmaßnahmen**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2016

### **Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff

Technische Universität Hamburg-Harburg  
Institut für Modellierung und Berechnung  
Denickestraße 17  
21073 Hamburg

Telefon: 040/42878-3032  
Fax: 040/42878-4353  
E-Mail: [estorff@tu-harburg.de](mailto:estorff@tu-harburg.de)  
Internet: <http://www.mub.tu-harburg.de>

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5057-8  
ISSN 1860-8221

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Modellierung und Berechnung an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Ausgangspunkt für diese Arbeit sind meine Forschungen im Projekt „Bora - Berechnung von Offshore Rammschall“.

Für die Unterstützung meiner Forschung bedanke ich mich herzlich bei Herrn Professor Otto von Estorff. Neben einer sehr guten Betreuung während meiner gesamten Tätigkeit am Institut, räumte er mir stets Freiraum für die Umsetzung verschiedenster Forschungsideen ein und stand mir immer mit seinem Rat zur Seite. Hierdurch habe ich eine optimale Förderung meiner Forschungsarbeit erfahren.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Herrn Professor Michael Möser für die Übernahme der Aufgabe des Zweitgutachters. Dies war für mich eine besondere Freude, da ich bereits in meinem Master-Studium Kontakt zu Herrn Möser pflegte wie zum Beispiel über gemeinsame Minuten in Prüfungen.

Weiterhin möchte ich mich bei all meinen Kollegen vom Institut und weiterhin den zahlreichen Projektpartnern aus der Offshore-Branche und Wissenschaft bedanken. Besonders hervorzuheben sind hierbei meine Bürokollegen Sören Keuchel und Thorben Schröder. Ebenfalls besonders bedanken möchte ich mich bei Marcel Ruhnau und Stephan Lippert, die viele fachliche Diskussionen zum Thema Rammschall mit mir führten und somit den Fortschritt meiner Arbeit laufend unterstützt haben.

Meinen zahlreichen Studenten möchte ich auf diesen Weg natürlich auch herzlich für die zumeist tolle und ergebnisreiche Zusammenarbeit danken.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Freundin Svenja Schulze und bei meiner Familie, die mir stets zur Seite standen und mir eine persönliche Hilfe waren.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Stand der Forschung . . . . .	4
1.2.1	Numerische Modellierung von Offshore-Rammschall . . . . .	4
1.2.2	Erkenntnisse aus verschiedenen Offshore-Messungen . . . . .	7
1.3	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>13</b>
2.1	Akustische Grundlagen . . . . .	13
2.1.1	Wellengleichung der Akustik . . . . .	14
2.1.2	Akustische Pegelgrößen . . . . .	15
2.1.3	Beamforming . . . . .	16
2.2	Theoretische Betrachtung der Schallemission bei Offshore-Rammarbeiten	20
2.2.1	Analytische Modellierung eines Impulshammers . . . . .	20
2.2.2	Untersuchungen bezüglich eines homogenen Meeresbodens . . . . .	23
2.2.3	Untersuchungen bezüglich eines mehrschichtigen Meeresbodens . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Numerische Grundlagen</b>	<b>29</b>
3.1	Finite-Elemente-Methode . . . . .	29
3.1.1	Strukturmechanik . . . . .	30
3.1.2	Akustik . . . . .	33
3.1.3	Kopplung und Kontaktmodellierung . . . . .	36
3.1.4	Nichtreflektierende Randbedingung . . . . .	38
3.2	Analyse der Wellengleichung der Pfahlrammung (WEAP) . . . . .	39
3.2.1	Grundgedanke der WEAP-Methode . . . . .	39
3.2.2	Mathematische Umsetzung . . . . .	40

---

<b>4 Modellierung</b>	<b>43</b>
4.1 Kraftfunktion eines Impulshammers . . . . .	45
4.2 Äquivalente Pfahldämpfung . . . . .	47
4.3 Akustischer Druck im Wasser . . . . .	50
4.4 Anmerkungen zur räumlichen Diskretisierung . . . . .	52
<b>5 Vorstellung durchgeführter Offshore-Messkampagnen (OMK)</b>	<b>53</b>
5.1 OMK 1 . . . . .	54
5.2 OMK 2 . . . . .	56
5.3 OMK 3 . . . . .	58
<b>6 Validierung der numerischen Modelle</b>	<b>61</b>
6.1 Erste Vorlaufrechnung . . . . .	61
6.2 Hauptmodell . . . . .	64
6.3 Erweitertes Hauptmodell . . . . .	79
6.4 Schlussfolgerungen . . . . .	82
<b>7 Numerische Untersuchungen</b>	<b>85</b>
7.1 Untersuchung des Einflusses der Pfahlkopfkraft . . . . .	85
7.1.1 Theoretische Betrachtung . . . . .	86
7.1.2 Numerische Betrachtung . . . . .	87
7.1.3 Weiterführende Untersuchungen . . . . .	90
7.1.4 Schlussfolgerungen . . . . .	95
7.2 Untersuchung des Einflusses von passiven schallmindernden Maßnahmen . . . . .	96
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
8.1 Zusammenfassung . . . . .	107
8.2 Ausblick . . . . .	108
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>