

Dämpfungswirkung von HSD und BBC bei der Rammung von Monopfählen beim OWP Amrumbank West

Philipp Stein¹, Hauke Sychla¹, Benedikt Bruns¹, Christian Kuhn¹,
Dr. Jörg Gattermann¹, Jan Degenhardt²

¹ Technische Universität Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik,
E-Mail: j.gattermann@tu-braunschweig.de

² E.ON Climate & Renewables GmbH, E-Mail: janole.degenhardt@eon.com

Einleitung

Bei der Installation von Gründungspfählen für Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) stellt die Schlagrammung derzeit den Stand der Technik dar. Das Verfahren ist erprobt und kann in den meisten Böden, die in der deutschen Nord- und Ostsee vorkommen, angewandt werden. Durch die Schlagrammung werden hohe, impulsartige Hydroschall-Emissionen hervorgerufen, welche marine Lebewesen schädigen oder zumindest deren Verhalten stören [1]. Das Umweltbundesamt (UBA) hat daraufhin eine Empfehlung für Grenzwerte des Hydroschalls herausgegeben, nach welcher der Einzelereignispegel (sound exposure level, SEL) einen Wert von 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ und der Spitzenpegel (L_{peak}) einen Wert von 190 dB re 1 μPa in einer Entfernung von 750 m zur Rammlokation nicht überschreiten dürfen [2]. Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) als zuständige Genehmigungsbehörde für Bauarbeiten in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) setzt diese Grenzwerte für die Rammung von Offshore-Gründungen fest.

Zur Minderung des Unterwasserschalls wurden zunächst Große Blasenschleier (engl. big bubble curtain, BBC) eingesetzt, welche in bestimmten Konfigurationen Reduktionen des Hydroschalls um bis zu 15 dB (SEL) erreichen können [3]. Zusätzlich wurden alternative Schallminderungsverfahren erprobt, die direkt am zu rammenden Pfahl eingesetzt werden [4]. Hiervon kamen bisher der IHC Noise Mitigation Screen sowie die Hydro-Schall-Dämpfer (HSD) über den Versuchs-Status hinaus. Beide Systeme erzielen ähnliche oder bessere Dämpfungswirkungen als der BBC [5].

Zur Einhaltung der Grenzwerte des Unterwasserschalls bei größer werdenden Pfahldurchmessern reichen die verfügbaren Systeme allein nicht mehr aus. Bei der Rammung von Monopfahlgründungen mit Durchmessern von aktuell bis zu 7 m können ungeminderte Schallpegel von über 180 dB (SEL) auftreten [6].

Beim Offshore-Windpark (OWP) Amrumbank West, bei dem Monopfähle von 6 m Durchmesser zur Gründung der OWEA eingesetzt werden, wurden daher das HSD-System direkt am Pfahl sowie ein BBC in einiger Entfernung um das Errichterschiff eingesetzt. Neben dem Baubanking wurden mehrere Pfahlrammungen im Rahmen des Forschungsvorhabens *triad* (FKZ 0325681) messtechnisch begleitet.

Messkampagnen

Zur Erforschung der Wellenausbreitung im Gesamtsystem bestehend aus Pfahl, Boden und Wasser wurden diese drei Bereiche messtechnisch untersucht (vgl. Abbildung 1). An drei Monopfählen wurden Dehnungsmessstreifen und Beschleunigungssensoren appliziert und mittels einer autarken Messwerterfassung im Pfahl die Bewegungen und dynamischen Verformungen während der Rammung erfasst. Am Meeresboden wurden in Abständen von 25 m bis 1.500 m zum Monopfahl triaxiale Geophone platziert und an denselben Positionen in verschiedenen Höhen Hydrophone über die Wassersäule verteilt. Die Datenerfassung erfolgte in Entfernungen bis 145 m zum Pfahl online, direkt auf dem Errichterschiff. In größeren Entfernungen wurden autarke Messbojen von einem Begleitschiff ausgesetzt.

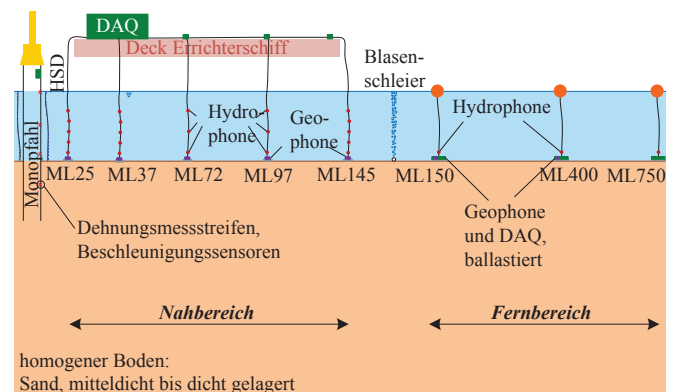


Abbildung 1: Messkonzept des Forschungsvorhabens *triad*

Die Bezeichnung der Messlokationen (ML) bezieht sich auf die Entfernung zum Pfahl in Metern. Während die Messlokationen an Bord des Errichterschiffes (Nahbereich, ML25 bis ML145) durch Installationen an Deck vorgegeben waren, wurden die Abstände der drei Messlokationen außerhalb des Blasenschleiers (Fernbereich) variiert. Eine Messung in 750 m Entfernung wurde entsprechend der Messvorschrift des BSH [7] immer durchgeführt.

Insgesamt konnten bei drei Messkampagnen acht Pfahlrammungen mit unterschiedlichen Schallminderungskonfigurationen messtechnisch begleitet werden. Die Messsysteme im Nah- und Fernbereich kamen dabei immer zum Einsatz, bei jeder Messkampagne wurde ein Pfahl messtechnisch bestückt. Die Randbedingungen der verschiedenen Pfähle im OWP Amrumbank West können als

sehr ähnlich angesehen werden, da die Wassertiefen konstant und der Baugrund sehr homogen ist. Dies bedingt auch die nahezu identischen Einbindelängen und Querschnitte der einzelnen Monopfähle.

Pegelentwicklung über die Pfahlrammung

Zur Untersuchung der Wellenausbreitung im ungestörten System sowie für die Ermittlung von Vergleichswerten der Hydroschallpegel ohne Schallminderungssysteme wurden am Pfahl A66 des OWP Amrumbank West Referenzmessungen durchgeführt. Bei der Rammung dieses Pfahls kam nach Absprache mit der Genehmigungsbehörde kein Schallminderungssystem zum Einsatz. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung des SEL sowie der Rammenergie über den Verlauf der Rammung beim Referenzpfahl A66. Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der Schallpegel mit zunehmender Entfernung sowie der Anstieg der Schallpegel bei Erhöhung der Rammenergie. Am Ende der Rammung wurde an ML750 in 750 m Entfernung zum Pfahl ein Schallpegel von 176 dB (SEL) gemessen. Der erlaubte Grenzwert des SEL wird bei der Referenzmessung um 16 dB überschritten, wie nach [6] bei der ungeminderten Rammung eines 6 m-Monopfähles zu erwarten ist.

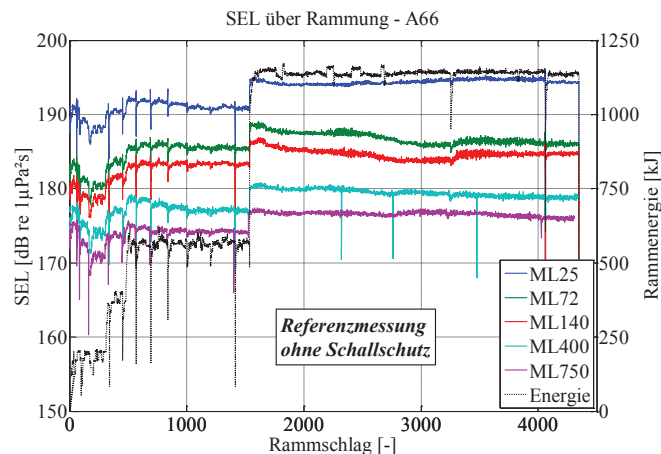


Abbildung 2: SEL in verschiedenen Entfernungen zum Pfahl (linke Ordinate, farbige Linien) und Rammenergie (rechte Ordinate, schwarze Linie) über den Verlauf der Rammung beim Referenzpfahl A66

Zu Beginn der Rammung ist entgegen der oben beschriebenen Tendenz ein Abfall des SEL bei gleichbleibend niedriger Rammenergie festzustellen. Dies kann auf den geringen Bodenwiderstand und die damit verbundene geringe Dämpfung der den Pfahl durchlaufenden Welle zurückgeführt werden. Anders als der L_{peak} hängt der SEL nicht nur von der Amplitude, sondern auch von der Dauer eines Einzelschallereignisses ab, wie Gleichung (1) verdeutlicht:

$$SEL = \frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \quad [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad (1)$$

Dabei ist $T_0 = 1 \text{ s}$ die Bezugszeitdauer, $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ der Bezugsschalldruck. Die Zeitpunkte T_1 und T_2 stellen den Anfang und das Ende des Schallereignisses dar, dessen

Energiegehalt durch Integration des Hydroschalldruckes p über die Zeit t ermittelt wird.

Abbildung 3 zeigt die integrierten axialen Beschleunigungen als Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe des 35. und des 340. Schlages beim Pfahl A66. Bei Schlag 35 sind nach dem durch den Hammerschlag eingeleiteten Impuls sechs Reflektionen über etwa 100 ms zu erkennen. Schlag 340 hingegen weist eine starke Bodendämpfung auf. Es sind lediglich zwei Reflektionen der durchlaufenden Welle innerhalb von etwa 50 ms zu erkennen, nach 150 ms schwingt der Pfahl nicht mehr nach.

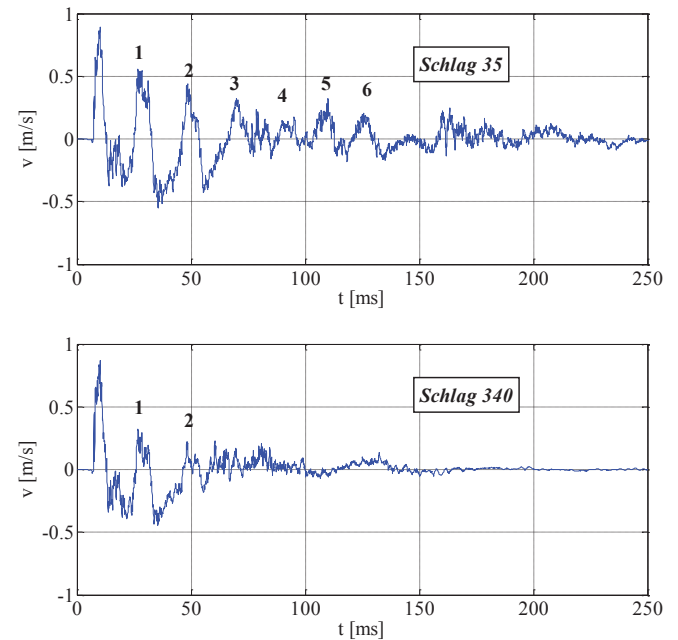


Abbildung 3: Geschwindigkeitsverlauf (integrierte Beschleunigung) am Pfahl A66 bei Schlag 35 (oben) und Schlag 340 (unten)

Wie einleitend beschrieben, wurden beim OWP Amrumbank West zwei Schallminderungssysteme (HSD und BBC) eingesetzt. Aus bauverfahrenstechnischen Gründen konnte das HSD-System jedoch erst über den Pfahl gehoben werden, nachdem dieser eine vorübergehende Standsicherheit erreicht hatte und der Pile-Gripper geöffnet werden konnte. In Abbildung 4 ist die Entwicklung von SEL und Rammenergie beim Pfahl A23 analog zu Abbildung 2 dargestellt.

Die Teilung der Rammung ist etwa bei Schlag 1.600 zu erkennen. In der ersten Phase kommt lediglich der BBC als Schallminderungssystem zum Einsatz, die Rammenergie ist auf etwa 800 kJ begrenzt, um den Grenzwert des Hydroschalls nicht zu überschreiten. Mit Einsatz des HSD-Systems wird die Rammenergie weiter gesteigert, der Grenzwert dennoch eingehalten. Im Vergleich zum Referenzpfahl A66 ergibt sich bei gleicher Rammenergie am Ende der Rammung eine Schallminderung durch den kombinierten Einsatz von HSD und BBC von etwa 16 dB (SEL). Die Messungen im Rahmen des Baumontorings bestätigen diese Ergebnisse und zeigen Pfahlrammungen im OWP Amrumbank West mit einer deutlichen Unterschreitung der Grenzwerte [8].

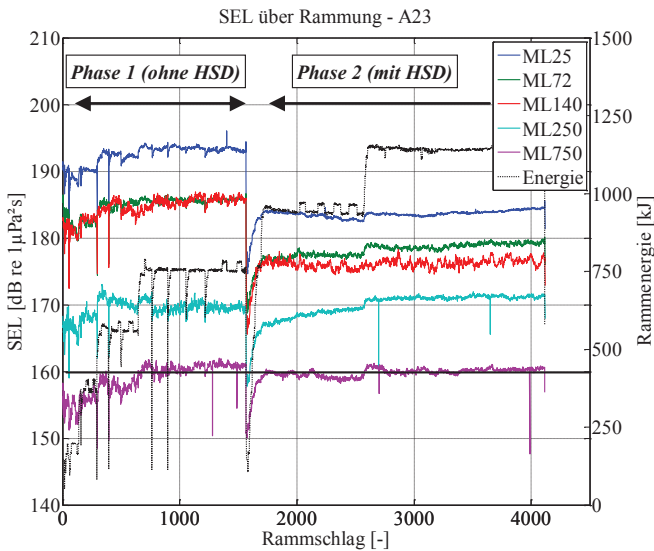


Abbildung 4: SEL in verschiedenen Entfernungen zum Pfahl (linke Ordinate, farbige Linien) und Rammenergie (rechte Ordinate, schwarze Linie) über den Verlauf der Rammung beim Pfahl A23

Schallausbreitung im Nahbereich

Durch die dichte Messmatrix im Nahbereich mit mehreren Hydrophon-Arrays innerhalb des Blasenschleiers (vgl. Abbildung 1) lässt sich die Schallausbreitung bis etwa 150 m von der Pfahlrammung besonders detailliert beschreiben. Durch die zweigeteilte Rammung beim Einsatz des HSD-Systems lässt sich durch den Vergleich der letzten Schläge der ersten Phase der Installation (ohne HSD) mit den ersten Schlägen der zweiten Installationsphase (mit HSD) bei gleicher Rammenergie eine fundierte Aussage über die Dämpfungswirkung des HSD-Systems im Nahbereich treffen.

Abbildung 5 zeigt den zweidimensionalen Verlauf des SEL im Nahbereich über die Wassertiefe und die Entfernung zum Pfahl während der Rammung des Pfahls A45.

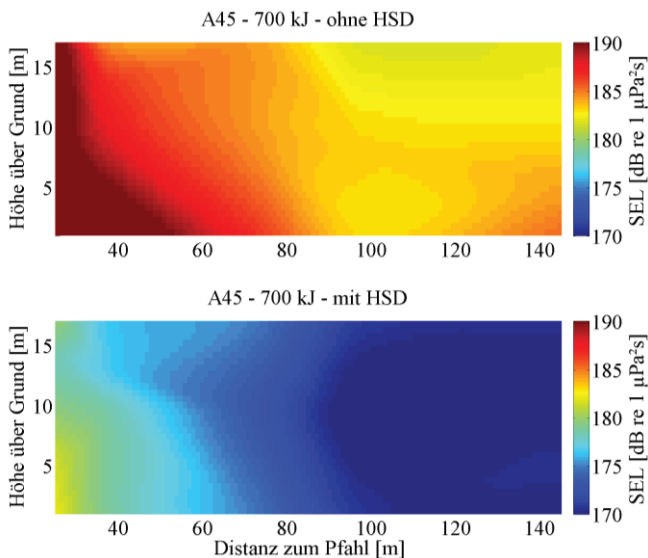


Abbildung 5: Konturplots des SEL im Nahbereich der Rammung des Pfahls A45 ohne HSD (oben) und mit HSD (unten) bei 700 kJ Rammenergie und gleicher Einbindung

Zu erkennen ist die Abnahme der Schallintensität mit größerem Abstand zum Pfahl sowie ein tendenziell größerer Schallpegel am Boden. Dies wird in der Messvorschrift durch die Forderung nach Positionierung der Hydrophone zwischen 2 m und 3 m über Boden berücksichtigt [8]. Der leichte Einbruch des Schallpegels in knapp 100 m Entfernung zum Pfahl ist durch eine Verschattung der Messlokation ML97 durch eines der Beine des Errichterschiffes zu erklären. Beim Vergleich des oberen und des unteren Konturplots lässt sich eine Schallminderung im Nahbereich allein durch den Einsatz des HSD-Systems von etwa 13 dB (SEL) an diesem Pfahl feststellen.

Geometrische Dämpfung im Frequenzbereich

Die in Abbildung 5 zu erkennende Abnahme der Hydroschallpegel über die Entfernung lässt sich für den SEL mit einem logarithmischen Ansatz der Form

$$\Delta_{SEL} = k \cdot \log(R [m]) \quad [\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}] \quad (2)$$

beschreiben. Dabei ist R der Abstand zur Schallquelle in Metern. Mit dem Faktor k werden die Randbedingungen des Schallausbreitungsproblems berücksichtigt. Für die deutsche Nordsee gilt nach [7] $k=15$ für die Korrektur von Hydroschallmessungen zwischen 750 m und 1500 m. Bei den Messungen im OWP Amrumank West konnte im Bereich von 25 m bis 750 m mit $k=13,5$ eine sehr gute Nachbildung der gemessenen Werte erzielt werden. Die Abweichung lag hier bei unter 1 dB.

Im Frequenzbereich offenbart sich eine deutliche Frequenzabhängigkeit der Pegelabnahme über die Entfernung. Abbildung 6 zeigt die Terzanalysen des Rammerschalls gegen Ende der Installation des Referenzpfahls. An den beiden Messlokalationen im Nahbereich (25 m und 72 m vom Pfahl) zeigt sich eine recht gleichmäßige Verteilung des SEL über den Frequenzbereich, während in größerem Abstand (400 m und 750 m vom Pfahl) der SEL insbesondere in den tiefen und hohen Frequenzen stark abfällt.

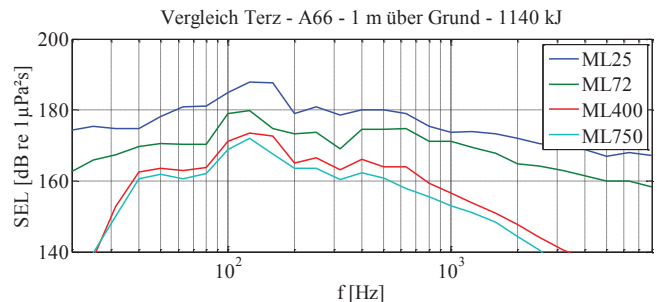


Abbildung 6: Frequenzanalyse des Rammlärms in verschiedenen Entfernungen bei Rammung des Pfahls A66 bei maximaler Rammenergie

Im niederfrequenten Bereich wird hierbei die untere Grenzfrequenz wirksam. Abhängig von der Wassertiefe werden Wellen ab einer gewissen Länge stark gedämpft [9 in 10]. Auch im hochfrequenten Bereich kommt es zu einem stärkeren Energieverlust der Schallwellen, was auf eine stärkere Dissipation höherfrequenter Wellen im Wasser

zurückzuführen sein kann [11]. So entstehen in einiger Entfernung zur Rammung die typischen Terzverläufe mit einem maßgeblichen Anteil der Schallintensität im Bereich von etwa 100 bis 1.000 Hz.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *triad* wird die Wellenausbreitung in Pfahl, Boden und Wasser bei der Rammung von Offshore-Gründungspfählen sowie die Schallminderungswirkung von HSD und BBC untersucht. Durch ein umfangreiches Messprogramm können die Schallausbreitung im Nahbereich detailliert untersucht, Vorgänge an der Schallquelle analysiert und der Hydroschallpegel in der für die Einhaltung des in Deutschland geltenden Grenzwertes maßgeblichen Entfernung erfasst werden.

Durch verschiedene Schallminderungskonfigurationen kann die Wirksamkeit der Systeme HSD und BBC bewertet werden. Detaillierte Auswertungen sind derzeit in Arbeit, jedoch zeigen die in diesem Beitrag enthaltenden Messungen bereits die Eignung der gewählten Schallminderungskonfiguration aus HSD und BBC für Monopfahl-Projekte. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass stets eine Anpassung an die projektspezifischen Randbedingungen notwendig ist.

Danksagung

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsvorhabens *Evaluierung von zwei gemeinsam eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen (HSD und BBC) bei den Monopile-Gründungen im OWP Amrumbank West – Untersuchung der Schallkopplungen zwischen Pfahl, Boden und Wasser – triad* (FKZ 0325681) durchgeführt. Als Kooperationspartner im Forschungsvorhaben wurden die Messkampagnen von der E.ON Kraftwerke GmbH und E.ON Climate & Renewables ermöglicht und unterstützt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] Koschinski, S.; Lüdemann, K.: Entwicklung schallmindernder Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen. Bundesamt für Naturschutz, Nehnten und Hamburg, 2013
- [2] Umweltbundesamt: Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Umweltbundesamt, 2011, www.umweltbundesamt.de/publikationen/empfehlung-von-laermschutzwerten-bei-errichtung-von
- [3] Diederichs, A.; Pehlke, H.; Nehls, G.; Bellmann, M.; Gerke, P.; Oldeland, J.; Grunau, C.; Witte, S.; Rose, A.: Entwicklung und Erprobung des Großen Blasen-schleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten – Schlussbericht Hydroschall-Off BWII. Förderkennzeichen 0325309A/B/C, Husum, März 2014
- [4] Wilke, F.; Kloske, K.; Bellmann, M.: Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl (ESRa) – technischer Abschlussbericht. Förderkennzeichen 0325307, Mai 2012
- [5] Bellmann, M.; Remmers, P.; Gündert, S.; Müller, M.; Holst, H.; Schultz-von Glahn, N.: Is there a state-of-the-art regarding noise mitigation systems to reduce pile-driving noise? Conference on Wind energy and Wildlife impacts, CWI 2015, 10-12 March 2015, Berlin, 2015
- [6] Bellmann, M.: Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2014, 16-19 November 2014, Melbourne, 2014
- [7] Müller, A.; Zerbs, C.: Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßnahmen. Hamburg, 2013, http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/Messvorschrift_Schalldaemmassnahmen.pdf
- [8] Institut für technische und angewandte Physik GmbH (itap): Kurzberichte zu Messungen der Hydroschallimmissionen bei den Rammarbeiten im Windpark Amrumbank West (unveröffentlicht), Oldenburg, 2014
- [9] Urick, R.: Principles of underwater sound. 3rd edition, Peninsula Publishing, Los Altos/CA, USA, 1983
- [10] Elmer, K.-H.; Betke, K.; Neumann, T.: Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen – Abschlussbericht Schall II. Förderkennzeichen 03229947, Hannover, 2007
- [11] Lurton, X.: An introduction to underwater acoustics – Principles and applications. 2nd edition, Springer Praxis, Heidelberg, New York, Oxford, 2010