Abschlussbericht

Unterwasserschall während des Impulsrammverfahrens: Einflussfaktoren auf Rammschall und technische Möglichkeiten zur Einhaltung von Lärmschutzwerten

Akronym: ERa - Bericht

Erfahrungsbericht Rammschall mit und ohne technische Schallminderungsmaßnahmen

Autoren: Dr. Michael A. Bellmann, Dipl.-Phys.
Adrian May, B. Eng.
Dr. Torben Wendt, M. Sc.
Stephan Gerlach, M. Sc.
Patrick Remmers, B. Eng.
Jana Brinkmann

Oldenburg, Mai 2020

Berichtsumfang: 130 + 8 Seiten Anhang

Itap GmbH
Marie-Curie-Straße 8
26129 Oldenburg

Zitierhinweis: Bellmann M. A., Brinkmann J., May A., Wendt T., Gerlach S. & Remmers P. (2020) Unterwasserschall während des Impulsrammverfahrens: Einflussfaktoren auf Rammschall und technische Möglichkeiten zur Einhaltung von Lärmschutzwerten. Gefördert durch das *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit* (BMU), FKZ UM16 881500. Beauftragt und geleitet durch das *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie* (BSH), Auftrags-Nr. 10036866. Editiert durch die *itap GmbH*.

(Hinweis: Dieser Bericht ist ebenfalls in Engl. Sprache erhältlich.)

Gefördert durch:

BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln aus dem Ressortforschungsplan des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit* unter dem Förderkennzeichen UM16 881500 gefördert. Das Vorhaben wurde durch das BSH beauftragt und geleitet (Auftrags-Nr. 10036866). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung bis auf das Kapitel 3 liegt beim Autor/bei den Autoren.

Disclaimer: Die Informationen im Kapitel 3 schildern die Vorgehensweise der Zulassungsbehörde für Offshore-Vorhaben in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee und wurden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zusammengefasst.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung 7
1.1 Relevanz und Aktualität der Studie 7
1.2 Datengrundlage und Ausrichtung der Studie 8
1.3 Projektübergreifende Erkenntnisse hinsichtlich Rammschall und der Anwendung von Schallschutzsystemen 9
1.4 Ausblick 14
2. Aufgabenstellung und Ziele 15
3. Rechtliche Vorgaben zum Schutz der belebten Meeresumwelt von impulshaltigen Schalleintrag durch Rammarbeiten 19
3.1 Entwicklung und Festlegung von verbindlichen Lärmschutzwerten für den Eintrag von Unterwasserschall bei Offshore-Rammarbeiten 19
3.2 Anordnungen zum Schallschutz in Zulassungsbescheiden für Offshore-Windparks und Plattformen in deutschen Gewässern 22
3.3 Umsetzung von Schallschutzmaßnahmen in Bauprojekten in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee 25
4. Schalltechnische Grundlagen 29
4.1 Pegelgrößen 29
4.1.1 (Energie-) äquivalenter Dauerschallpegel SPL (engl. Sound Pressure Level) 30
4.1.2 Einzelereignispegel (L_E ; engl. Sound Exposure Level - SEL) 30
4.1.3 Spitzenpegel $L_{p,pk}$ (engl. peak Sound Pressure Level or zero-to-peak Sound Pressure Level) 31
4.2 Anforderung an Unterwasserschallmessungen 32
4.3 Standardisierte Auswertung und Sammlung von Unterwasserschallmessungen im Fachinformationssystem MarinEARS[2] 34
4.4 Qualitätskontrolle von prozessierten Unterwasserschalldaten 37
5. Entstehung und Weiterleitung von impulshaltigem Unterwasserschall (Rammschall) 39
5.1 Standortspezifische Einflussfaktoren 39
5.1.1 Einfluss des Bodenwiderstandes 39
5.1.2 Bodenkopplungen 41
5.1.3 Einfluss der Wassertiefe 43
5.1.4 Bathymetrie, Strömung und Schallgeschwindigkeit 45
5.1.5 Schallausbreitung 46
5.1.6 Einfluss der Hydrophonhöhe im akustischen Fernfeld 52
5.2 Technisch-konstruktive Einflussfaktoren 55
5.2.1 Fundament- und Pfahl-Design 55
5.2.2 Rammhammer, Rammenergie und Rammprozess 59
5.2.3 Rammmethode und Pfahllänge 71
5.3 Zusammenfassung von Einflussfaktoren auf Rammschall 75
6. Offshore-taugliche und marktreife Schallschutzsysteme 78
6.1 Einleitung und Historie 78
6.2 Primäre Schallschutzmaßnahmen 79

6.3 Sekundäre Schallschutzmaßnahmen 79
6.3.1 Noise Mitigation Screen (NMS) 86
6.3.2 Hydroschall-Dämpfer (engl. Hydro Sound Damper – HSD) 88
6.3.3 Großer Blasenschleier (engl. Big Bubble Curtain – BBC) 91
6.3.4 Grout Annulus Bubble Curtain (GABC) 98
6.3.5 Kombination aus pfahlnahem und pfahlfernem Schallschutzsystem 100
6.4 Evaluierung der Wirksamkeit von sekundären Schallschutzsystemen 101
6.4.1 Definition und Messkonzept der Durchgangsdämpfung 101
6.4.2 Erzielte Schallminderung 105
6.4.3 Zusammenfassung der Erfahrungen mit der Anwendung von sekundären Schallschutzsystemen 115
7. Diskussion und Ausblick 117
7.1 Einfluss der spektralen Einfügungsdämpfung auf den wahrnehmbaren Schalleintrag ins Wasser 117
7.2 Herausforderungen für zukünftige Bauvorhaben 118
7.2.1 Größere Pfahldurchmesser für Monopfähle 119
7.2.2 Verwendung von Jacket-Fundamentstrukturen 119
7.2.3 Bodenbeschaffenheit und Bathymetrie 120
7.3 Technische und physikalische Grenzen der heutigen Schallschutzsysteme und ggf. mögliche Weiterentwicklungen 120
7.3.1 Noise Mitigation Screen - IHC-NMS 120
7.3.2 Hydroschall-Dämpfer – HSD 121
7.3.3 Großer Blasenschleier – BBC und DBBC 122
7.4 Alternative Schallschutzmaßnahmen 122
7.4.1 Sekundäre Schallschutzsysteme in der Entwicklung 122
7.4.2 Optimierungen der Impulsrammung 123
7.4.3 Alternative Gründungsverfahren und -strukturen 124
8. Literatur 127
9. Anhang 131
Anhang 1: Steckbriefe für jedes offshore-taugliche Schallschutzsystem 131
Noise Mitigation Screen der Firma *IHC-IQIP* (IHC-NMS) 132
Hydro-Schall-Dämpfer (HSD) der Firma OffNoise Solutions GmbH 133
Einfacher oder doppelter Großer Blasenschleier (BBC / DBBC) 134
Anhang 2: Abbildungsverzeichnis 135
Anhang 3: Tabellenverzeichnis 138

Abkürzungsverzeichnis

AEP	Akustisch evozierte Potenziale (engl. auditory evoked potential)
AIS	Automatisches Identifikationssystem (engl. Automatic Identification System)
ASCOBANS	Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic, North East Atlantic, Irish and North Sea (dt. Abkommen zur Erhaltung der Kleinwale in der Nord- und Ostsee, des Nordostatlantiks und der Irischen See)
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone (engl. Exclusive Economic Zone - EEZ)
BBC	Big Bubble Curtain (dt. großer Blasenschleier)
BfN	Bundesamt für Naturschutz (engl. Federal Agency for Nature Conservation)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz (engl. Federal Control of Pollution Act)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (engl. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety)
BNatschG	Bundes-Naturschutzgesetz (engl. Federal Nature Conservation Act)
BORA	Berechnung von Offshore-Rammschall (F&E-Vorhaben)
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (engl. Federal Maritime and Hydrographic Agency)
CAU	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
CTD	Conductivity, Temperature and Depth (dt. Leitfähigkeit, Temperatur, Tiefe)
dB	Dezibel
DBBC	Double Big Bubble Curtain (dt. Doppelter Großer Blasenschleier)
DIN SPEC	Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), DIN-Spezifikation
DP	Dynamic Positioning (dt. Dynamische Positionierung)
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESPOO	Übereinkommen über die Umweltverträglichkeitsprüfung im grenzüberschreitenden Rahmen (engl. Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context
ESRa	Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl
et al.	(lat.) und andere (u. a.)
F&E	Forschung & Entwicklung (engl. Research & Development)
FAD	Free Air Delivery (dt. Volumenstrom)
FEP	Flächenentwicklungsplan
FFH-RL	Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (engl. Flora-Fauna-Habitat-Directive)
f_g	Grenzfrequenz (engl. limiting frequency)
FKZ	Förderungskennzeichen (engl. support code)
HELCOM	Baltic Marine Environment Protection Commission – Helsinki Commission
HSD	Hydro Sound Damper (dt. Hydroschalldämpfer)
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission (dt. Internationale Elektrotechnische Kommission)
IHC - NMS	Noise Mitigation Screen der Firma IHC-IQIP bv
ISD	Institut für Statik und Dynamik der Leibniz Universität Hannover
ISO	International Organization for Standardization (dt. Internationale Organisation für Normung)
itap (GmbH)	Institut für technische und angewandte Physik GmbH
k	Ausbreitungskonstante (für die dt. AWZ der Nord- und Ostsee überschlägig k = 15)
kHz	Kilo-Hertz
kn	Knoten (engl. knots)
LAT	Lowest Astronomical Tide (dt. niedrigster möglicher Gezeitenwasserstand)
L_E / SEL	Einzelereignispegel (engl. Sound Exposure Level)

$L_{p,pk}$	Spitzenschalldruckpegel (zero-to-peak Sound Pressure Level)
MarinEARS	Marine Explorer and Registry of Sound (dt. Meeresforschung und nationales Schall-Register für die Meldung impulshafter Schallereignisse in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee an die EU nach Maßgabe der MSRL).
MSRL	Meeresstrategie Rahmenrichtlinie (engl. Marine Strategy Framework Directive)
NavES	Naturverträgliche Entwicklung auf See
NMS	Noise Mitigation System (dt. Schallschutzsystem)
OSPAR	Oslo Paris Convention (dt. OSPAR-Abkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordatlantiks)
OWEA	Offshore Windenergieanlage (engl. Offshore Wind Turbine Generator)
OWP	Offshore Windpark (engl. Offshore Windfarm – OWF)
PDA	Pile-Driving Analysis (dt. Rammbarkeitsanalyse)
PtJ	Projektträger Jülich (Forschungszentrum Jülich)
SL	Sensation Level (dt. Hörpegel bzw. Hörschall)
SPL	Sound Pressure Level (dt. Schalldruckpegel)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (dt. Signal-Rauschabstand)
TL	Transmission Loss (dt. Ausbreitungsdämpfung)
TTS	Temporal Threshold Shift (dt. temporäre Hörschwellenverschiebung)
TUHH	Technische Universität Hamburg Harburg
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung (engl. Environmental Impact Assessment)
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (engl. Environmental Impact Assessment Act)
WTD 71	Wehrtechnische Dienststelle 71 (engl. technical center of the German armed forces)

1. Zusammenfassung

1.1 Relevanz und Aktualität der Studie

Die Nutzung erneuerbarer Energiequellen auf See wächst schnell in Europa, auch in Deutschland, forciert durch den erneuerbaren Energieprozess nach 2011. Die Nachfrage nach erneuerbaren Energien muss jedoch mit dem Bewusstsein für Nachhaltigkeitsaspekte einhergehen, insbesondere für den Schutz der Natur und der marinen Ökosysteme. Neben anderen ökologischen Themen sind die Unterwasserschallemissionen in den Fokus gerückt, da die meisten Fundamente im Offshore-Bereich mit dem Impulsrammverfahren im Meeresboden verankert werden. Diese lärmintensive Installationsmethode führt zu impulshaltigen Schallemissionen (sogenannter Rammschall), die die Meereslebewesen schädigen können (z. B. Lucke et al., 2009). Für die naturverträgliche Nutzung der regenerativen Energiequellen auf See ist daher die Reduzierung dieses Schalleintrags ins Wasser zwingend erforderlich.

Zurzeit sind in der deutschen AWZ 18 Offshore-Windparks (OWP) in Betrieb, fünf OWPs befinden sich im Bau, wobei die schallintensive Installationsphase der Fundamente für die Offshore-Windenergieturbinen (OWEA) bereits abgeschlossen ist, und einige OWPs befinden sich in der Planung zur Erreichung der Ausbauziele. Hinzu kommen 35 Umpannstationen, Konverterplattformen und Messplattformen, wie *FINO1* bis *FINO3*.

Basierend auf der Meeresstrategie Rahmenrichtlinie (MSRL, 2008) ist für die europäischen Gewässer der „gute Umweltzustand“ auf nationaler, wie auch regionaler Basis für die jeweiligen Leitarten zu definieren und zu gewährleisten. Auch weitere, nicht europäische Länder streben einen naturverträglichen Ausbau der regenerativen Energiequellen an, so dass der Umgang mit und die Reduktion von impulshaftem Schalleintrag längst zu einem internationalen Thema geworden sind.

Der Schweinswal ist die einzige heimische Walart in deutschen Gewässern der Nord- und Ostsee. Zur Orientierung unter Wasser, zur Nahrungssuche und zur Kommunikation verwendet der Schweinswal ein Echo-Ortungssystem und reagiert daher sensibel auf eine Verlärmung der Meere. Aus diesen Gründen gilt diese Art in der deutschen Nord- und Ostsee als Schlüsselart im Rahmen der Bewertung von anthropogenen Schalleinträgen ins Wasser.

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist Zulassungs- und Überwachungsbehörde für Offshore-Vorhaben in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ). Dem Vorsorgeprinzip folgend setzte das BSH seit 2008 unter Einbeziehung der wissenschaftlichen Grundlagen und der Anforderungen des Umweltbundesamts erstmalig weltweit ein duales Lärmschutzwertkriterium von 160 dB_{SEL} (einzuhalten durch den 5% Überschreitungspegel des Einzelereignispegels) und 190 $dB_{Lp,pk}$ (einzuhalten durch den Spitzenpegel), welches in 750 m Entfernung zum Emissionsort bei Rammarbeiten einzuhalten ist, fest. In 2013 hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) das Schallschutzkonzept für den Schweinswal in der deutschen Nordsee erlassen, in

dem die Einhaltung der Lärmschutzwerte sowie der Habitat-Ansatz zur Vermeidung und zur Verminderung von kumulativen Auswirkungen verfolgt werden.

1.2 Datengrundlage und Ausrichtung der Studie

Bis 2019 einschließlich wurden 1.447 Fundament-Strukturen mit insgesamt über 2.400 Gründungspfählen mittels Impulsrammverfahren in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone der Nord- und Ostsee im Meeresboden verankert. Seit 2011 werden bei allen Rammarbeiten in deutschen Gewässern technische Schallschutzsysteme zur Einhaltung der o. g. Lärmschutzwerte seriell eingesetzt. Es hat sich dabei gezeigt, dass in den Jahren 2011 bis einschließlich 2013 die Lärmschutzwerte nicht verlässlich eingehalten werden konnten und somit Forschungs- und Entwicklungsarbeit hinsichtlich des technischen Schallschutzes erforderlich wurde. Die Bundesregierung hat mehrere F&E-Verbundprojekte unter Beteiligung der Industrie zur Entwicklung von Schallminderungssystemen gefördert. Schließlich ist es jedoch der Verdienst der Offshore-Windenergieindustrie, die den technischen Schallschutz unterstützt und entwickelt hat, dass ab 2014 offshore-taugliche Schallminderungssysteme zur Verfügung standen, die zu einer Einhaltung der Lärmschutzwerte führte. Die anfänglichen Schwierigkeiten lagen insbesondere an mangelnder Offshore-Tauglichkeit und mangelnder Zuverlässigkeit der Schallschutzsysteme, die am Markt verfügbar waren. Seit 2014 konnten gleich mehrere technische Schallschutzsysteme zu hochmodernen Systemen weiterentwickelt werden, mit denen die Lärmschutzwerte in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee verlässlich eingehalten werden können.

Zudem wurde bei allen Bauvorhaben eine engmaschige Überwachung der Schalleinträge ins Wasser in Anlehnung an die Messvorschriften des BSH (BSH, 2011; BSH 2013a) sowie an das StUK4 (2013) durchgeführt. Aus der Überwachung wurden umfassende Messdaten sowie beurteilungsrelevante Begleitinformationen der jeweiligen Bauvorhaben in standardisierter Form gesammelt. Basierend auf diesen Informationen wurde im Rahmen des F&E-Vorhabens NavES[1] unter Führung des BSH ein technisch-analytisches Fachinformationssystem für Unterwasserschall (MarinEARS)[2] entwickelt und erprobt, das seit 2016 in Betrieb ist. Somit steht ein sehr großer Datensatz an prozessierten Unterwasserschallmessdaten inkl. umfänglicher Begleitinformationen in standardisierter Form zur Verfügung.

Im Rahmen dieses technischen Berichtes wird die projektübergreifende Analyse über sämtliche 21 OWP-Bauvorhaben inkl. Umspannstationen und Konverterplattformen der Jahre 2012 bis 2019 aus der

[1] NavES: Naturverträgliche Entwicklung auf See, gefördert durch das BMU und geleitet durch das BSH. Phase 1: 10/2014 bis 09/2015; Phase 2: 10/2015 bis 12/2018; Phase 3: 10/2016 bis 12/2019. FKZ: 10036866

[2] MarinEARS – Marine Explorer and Registry of Sound; Fachinformationssystem für Unterwasserschall und nationales Schall-Register für die Meldung impulshaltiger Schallereignisse in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee an die EU nach Maßgabe der MSRL (https://marinears.bsh.de).

deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nord- und Ostsee dokumentiert. Dabei fokussiert dieser Bericht auf die technischen Schallschutzsysteme und -maßnahmen, die bereits beim Bau von mindestens einem kompletten OWP durchweg (Serienanwendung) eingesetzt wurden und sich als offshore-tauglich und robust herausgestellt haben.

Ziel des Berichts ist es, einen Überblick über standortspezifische und technisch-konstruktive Eigenschaften der Schallentstehung und der Weiterleitung von Rammschall sowie die damit notwendigen, technischen Lösungen mittels Schallminderungsmaßnahmen zur Einhaltung der Lärmschutzwerte zu geben.

Damit soll zum einen der projektübergreifende Wissensstand für die behördliche Prüfung von umweltfachlich relevanten Aspekten im Zuge von Zulassungs- und Bauüberwachungsverfahren von Offshore-Bauvorhaben zugänglich gemacht werden. Zum anderen stellt es eine projektübergreifende, umfassende und aktuelle Wissensgrundlage für die Planungssicherheit hinsichtlich der Auslegung von Fundamentstrukturen und der Entwicklung von Schallschutzkonzepten für zukünftige Bauvorhaben der Wirtschaft bereit.

1.3 Projektübergreifende Erkenntnisse hinsichtlich Rammschall und der Anwendung von Schallschutzsystemen

Technisch-konstruktive Einflussfaktoren: Den Hauptfaktor des Schalleintrages bei den Gründungsarbeiten mittels Impulsrammverfahren stellt die Quelle an sich dar, d. h. der Rammhammer einschließlich des Hammertyps und der hydraulischen Ansteuerung bzw. das verwendete Rammverfahren. Hinzu kommt das Fundament-Design. Insbesondere kann das anzuwendende Rammverfahren durch die Begrenzung der eingesetzten Energie sowie der Auswahl der Schlagwiederholungs-frequenz und Anzahl der Rammschläge pro definierter Einbindetiefe die Gesamtschallemission stark mindern (schalloptimiertes Rammverfahren), um damit die Einhaltung der geforderten Lärmschutzwerten nachhaltig zu beeinflussen. Zudem kann ggfs. auch projektspezifisch das Fundament-Design hinsichtlich der Einhaltung der Lärmschutzwerte zumeist in gewissen Grenzen variiert werden. Somit stellen die technisch-konstruktiven Einflussfaktoren ebenfalls auch eine fundamentale Möglichkeit der Schallminderungsmaßnahme dar.

Standortspezifische Einflussfaktoren: Darüber hinaus spielen standortspezifische Einflussfaktoren für den Schalleintrag ins und für dessen Ausbreitung im Wasser ebenfalls eine wesentliche Rolle. So haben u. a. der Meeresboden und die Wassertiefe bzw. Topographie einen erheblichen Einfluss auf die Amplitude des zu messenden Rammschalls. Derartige Einflussfaktoren können i. d. R. nicht verändert bzw. beeinflusst werden.

In Hinblick auf die Überwachung des Schalleintrags ist stets in den Analysen die Höhe der Ausbringung der Hydrophone in der Wassersäule zu berücksichtigen. Messungen in der unteren Hälfte der Wassersäule weisen signifikant höhere Pegel auf als nahe der Wasseroberfläche.

Schallminderungsmaßnahmen: Durch die Anwendung von technischen Schallschutzsystemen kann der bereits im Wasser vorhandene impulshaltige Rammschall reduziert werden. Es hat sich herausgestellt, dass das Design des Fundaments von OWEAs oder Umspannwerken als Ganzes und insbesondere das Pfahl-Design sich auch auf die passende Wahl und die Leistungsfähigkeit von Schallschutzsystemen auswirken.

Da Monopfahl-Fundamente derzeit der am häufigsten verwendete Fundamenttyp sind, wurden zunächst alle technischen Schallschutzsysteme für Monopfähle entwickelt und ausgelegt. Hierbei unterscheidet man grundsätzlich pfahlnahe und pfahlferne Schallschutzsysteme.

Im Gegensatz dazu gibt es nur wenige Schallschutzsysteme, die auch für die Installation von Jacket-Fundamenten geeignet sind. Eine große Einschränkung bei der Auswahl von Schallschutzsystemen ist der Tatsache geschuldet, dass bei mehrbeinigen Konstruktionen (Jacket, Tripod, Tripile) mehrere Gründungspfähle pro Fundament in einem definierten Abstand zueinander im Meeresboden verankert werden müssen. Somit werden die Gründungspfähle entweder durch die vorhandene Jacket- bzw. Tripod-Konstruktion gerammt oder alternativ eine Rammschablone eingesetzt. Beide Möglichkeiten schränken die Anwendung für pfahlnahe Schallschutzsysteme erheblich ein.

Robuste und offshore-taugliche Schallschutzsysteme: In den letzten acht Jahren haben sich drei Basis-Schallschutzsysteme erfolgreich in deutschen Gewässern unter realen Offshore-Bedingungen im Serienbetrieb einzeln oder in Kombination bewährt:

- ein Großer Blasenschleier von mehreren Lieferanten in einfacher und doppelter Ausführung (engl. single Big Bubble Curtain – BBC; double Big Bubble Curtain – DBBC) in einer Entfernung von mindestens 60 m um die Rammposition (pfahlfernes Schallschutzsystem), hierbei ist auf eine optimale Systemkonfiguration der BBC-Systemkonfiguration zu achten,
- ein Rohr-in-Rohr-Schallschutzsystem der Firma *IHC IQIP bv* (engl. Noise Mitigation Systems - IHC-NMS) als pfahlnahes Schallschutzsystem und
- ein Hydroschall-Dämpfer (engl. Hydro Sound Damper - HSD) der Firma *OffNoise Solutions GmbH* ebenfalls als pfahlnahes Schallschutzsystem.

Andere technische Schallschutzsysteme wurden als Prototypen entwickelt und unter Offshore-Bedingungen vereinzelt getestet oder befinden sich in der Entwicklung. Diese Systeme sind jedoch derzeit noch nicht für eine Serienanwendung während der Gründungsarbeiten eines kompletten OWPs einsatzbereit oder wurden bisher nicht in der deutschen AWZ im Serieneinsatz angewendet.

Schallschutz bei Monopfahl-Installationen: BBC- und IHC-NMS-Systeme konnten erfolgreich als einzelne Schallschutzsysteme in Wassertiefen bis 25 m, bei sandigem Boden und kleinen Monopfahl-Durchmessern je nach eingesetzter Rammenergie in der Nordsee eingesetzt werden. Dagegen wurde das pfahlnahe HSD-System insbesondere für die Schallminderung im tieffrequenten Bereich entwickelt und immer in Kombination mit einem einfachen oder doppelten BBC-System eingesetzt.

Bei Projekten an Standorten, wo die Wassertiefe 25 bis max. 40 m und der Pfahldurchmesser zumeist $\geq$ 6 m betrug, wurde eine Kombination von zwei Schallschutzsystemen angewendet. Die eingesetzten, kombinierten Systeme beinhalteten bisher ein BBC-System im Fernfeld (in einfacher oder doppelter Ausführung) und ein IHC-NMS oder HSD-System in Pfahlnähe.

Schallschutz bei der Installation von Jacket- bzw. Tripod-Konstruktionen: Bisher wurden bei Jacket-Konstruktionen lediglich ein optimierter, einfacher oder doppelter BBC angewendet. In einigen wenigen Fällen wurde bei großen Wassertiefen der DBBC mit einem Blasenschleiersystem in Pfahlnähe (engl. Grout Annulus Bubble Curtain, GABC; kleiner Blasenschleier) kombiniert. Aufgrund der zumeist deutlich kleineren Pfahldurchmesser konnten damit die deutschen Lärmschutzwerte bei Wassertiefen von bis zu 40 m und einem schalloptimierten Rammverfahren eingehalten werden.

Im Nachfolgenden werden die drei offshore-tauglichen Schallschutzsysteme kurz beschrieben. Für jedes dieser Schallschutzsysteme ist zudem im Anhang 9 ein entsprechender Steckbrief mit sämtlichen relevanten Daten zusammengefasst.

Großer Blasenschleier DBBC / BBC: Der Große Blasenschleier ist ein pfahlfernes Schallschutzsystem, welches bisher am häufigsten bei OWP-Bauvorhaben verwendet wurde. Die Erfahrung mit einem optimierten Großen Blasenschleier (BBC) zeigt, dass das technische Design und die Bestandteile des BBC-Systems die Funktionalität des Schallschutzsystems direkt beeinflussen und somit die Effektivität für die Schallreduzierung maßgeblich bestimmen. Die Düsen- und Zuluftschläuche sowie die Druckluftmenge inkl. der Typ der Kompressoren gehören zu den Hauptkomponenten. Die Art der Auslegung der Düsenschläuche auf dem Meeresboden hinsichtlich der Form und der Verlegegenauigkeit sowie die Entfernung zur Rammstelle sind ebenfalls wesentlich für die erzielte Schallminderung auf See. Zudem kommt es bei der Verwendung eines Großen Blasenschleiers immer wieder zu Verdriftungseffekten aufgrund der vorherrschenden Strömung, die durch eine konstruktive Auslegung des Blasenschleiersystems mit größerem Abstand zum Fundament in Strömungsrichtung bei Strömungen von bis zu 0,75 m/s (entspricht ca. 1,5 kn) kompensiert werden können. Darüber hinaus nimmt die erzielte Schallminderung in Strömungsrichtung erheblich ab. Zudem zeigte sich, dass sich aufgrund des statischen Gegendrucks die Schallminderung mit zunehmender Wassertiefe stetig reduzierte. Die Unterschiede zwischen einem einfachen und einem doppelten, optimierten BBC mit ähnlichen Systemkonfigurationen lagen unabhängig von der Wassertiefe um 3 dB. Schallminderungen von bis zu

16 dB wurden mithilfe eines optimierten, doppelten Großen Blasenschleiers (DBBC) bei 40 m Wassertiefe erzielt.

Mit dem Einsatz eines optimierten DBBC-Systems konnten bei Jacket-Konstruktionen bis 30 m Wassertiefe die Einhaltung der deutschen Lärmschutzwerte erreicht werden. Bei Monopfahl-Installationen im sehr flachen Wasser (≤ 25 m) konnten die Lärmschutzwerte bei geringen Pfahldurchmessern bereits nur durch den Einsatz eines optimierten DBBC-Systems eingehalten werden, so dass ein pfahlnahes Schallschutzsystem nicht notwendig wurde.

Basierend auf den Erfahrungen bei der Anwendung eines Großen Blasenschleiers wurden somit Mindestanforderungen spezifiziert, die nach derzeitigem Kenntnisstand erfüllt sein müssen, um eine optimale Schallminderung bei Gründungsarbeiten im Impulsrammverfahren zu gewährleisten.

Die bisherigen Einsätze des BBC- und DBBC-Systems in der deutschen AWZ der Ostsee weisen eine höhere Schallminderung auf als in der Nordsee. Hintergrund ist, dass die Strömung in der Ostsee zumeist deutlich geringer als in der Nordsee ausfällt und somit keine bzw. nur sehr geringe Verdriftungserscheinungen auftreten.

Noise Mitigation Screen (IHC-NMS): Das IHC-NMS wurde als pfahlnahes Schallschutzsystem bisher mehrere hundert Mal erfolgreich eingesetzt. Die Erfahrungen mit dem IHC-NMS zeigen bis zu einer Wassertiefe von 40 m Schallminderungen im Bereich von 13 bis 17 dB unabhängig von der Wassertiefe und der Strömung (≤ 0,75m/s). Bei den Anwendungen des IHC-NMS in neuster Generation in den Jahren 2018 bis 2020 mit Pfahldurchmessern von bis zu 8,0 m betrug die Schallminderung 15 bis 17 dB. Für Pfahldurchmesser < 6 m in sandigen Böden und Wassertiefen < 25 m konnte das IHC-NMS in Kombination mit einem schalloptimierten Rammverfahren die deutschen Lärmschutzwerte als einzelnes technisches Schallschutzsystem einhalten. Für Pfahldurchmesser ≥ 6 m wurde das IHC-NMS in Kombination mit einem optimierten (D)BBC-System eingesetzt.

Der große Vorteil des IHC-NMS ist, dass es nicht nur als effektives Schallschutzsystem, sondern zusätzlich auch als Pfahlführungssystem dient. Zudem kann mit dem System die Neigungsmessung des zu installierenden Pfahls in Lotrichtung durchgeführt werden.

Bisher wurde dieses Schallschutzsystem noch nicht in der deutschen AWZ der Ostsee eingesetzt.

Frequenzabhängige Schallminderung: Sowohl der Große Blasenschleier, als auch das IHC-NMS weisen eine frequenzabhängige Schallminderung auf. Die Schallminderung ist im Frequenzbereich < 250 Hz geringer als bei höheren Frequenzen (> 1 kHz), wo sogar Schallminderungen von > 20 dB durch das einzelne System erzielt werden können. Die breitbandige, einzahlige Schallminderung der beiden Schallschutzsysteme wird somit geringfügig durch den tieffrequenten Bereich limitiert. Dabei ist die erzielte Schallminderung bei einem Großen Blasenschleier zu tiefen Frequenzen deutlich stärker limitiert als bei einem IHC-NMS.

Hydroschall-Dämpfer (HSD): Die Erfahrungen mit dem HSD-System in verschiedenen konstruktiven Ausführungen zeigen in Wassertiefen bis 40 m ein Reduktionspotenzial im unteren zweistelligen Dezibel-Bereich - unabhängig von der Wassertiefe und der vorherrschenden Strömung (< 0,75 m/s) - bei sandigen Böden in der deutschen AWZ der Nordsee. Das HSD-System besteht im Wesentlichen aus drei technischen Komponenten: (i) einer Absenk- und Hebevorrichtung mit Winden, (ii) einem Netz mit HSD-Elementen und (iii) einer sogenannten Ballast-Box, so dass das HSD-Netz zwischen der Wasseroberfläche und dem Meeresboden um den jeweiligen Monopfahl vollständig umschließend montiert werden kann. Das Design des HSD-Systems, insbesondere das der notwendigen Ballast-Box und der damit verbundenen Absenk- und Hebevorrichtung, scheint für das gesamte Reduktionspotenzial wesentlich zu sein.

Vorteil dieses technischen Schallschutzsystems ist, dass unterschiedliche HSD-Elemente zum Einsatz gebracht werden können, die sich aufgrund ihrer Materialeigenschaften und ihrer Größen auf verschiedene Frequenzen je nach Wassertiefe (und damit statischem Gegendruck) im tieffrequenten Bereich abstimmen lassen. Das HSD-System hat sein höchstes Reduktionspotenzial zumeist bei niedrigen Frequenzen (< 200 Hz) und wurde immer ergänzend zu einem (D)BBC bei großen Monopfahl-Durchmessern und Wassertiefen von > 25 m angewendet. Im Gegensatz zum IHC-NMS weist das HSD-System kein Schallreduktionspotenzial in höheren Frequenzen auf. Im Vergleich zum IHC-NMS weist dieses System eine geringere Gesamtmasse auf. Es ist allerdings erforderlich die Pfahlführung und Bemessung projektspezifisch an das HSD-System anzupassen.

Bisher wurde das HSD-System nur bei einem OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Ostsee eingesetzt. Hierbei fiel die erzielte Schallminderung erheblich geringer aus als in der Nordsee. Der Grund für die unterschiedliche erzielte Schallminderung könnte u. a. durch das Design der Ballastbox und den sehr harten Bodenschichtungen der Ostsee begründet sein.

Erzielte Schallminderung bei kombinierten Schallschutzsystemen: Breitbandig sind somit mit einem einzelnen Schallschutzsystem bis 25 bzw. 30 m Wassertiefe durchaus Schallminderungen von 10 bis 15 dB je nach verwendetem Schallschutzsystem zu erzielen. Mit zunehmender Wassertiefe ist zumeist von einer reduzierten Schallminderung auszugehen, insbesondere bei Verwendung eines einfachen oder doppelten Großen Blasenschleiers. Mit einer Kombination von zwei unabhängigen Schallschutzsystemen (pfahlnahes und pfahlfernes Schallschutzsystem) wurde eine Schallminderung von durchschnittlich 20 dB bei bis zu 40 m Wassertiefe erreicht.

Stand der Technik: Die Frage, ob nach Jahren der (Entwicklung und der Anwendung beim Bau von Offshore-Windparks technische Schallschutzsysteme einen Stand der Technik erreicht haben, ist aus der Sicht der Industrie und der deutschen Zulassungsbehörden für Monopfähle bis 8 m Durchmesser und Wassertiefen bis 40 m positiv zu beantworten. Es ist jedoch bei der Anwendung jedes einzelnen dieser drei technischen Schallschutzsysteme auf eine projektspezifische Anpassung zu achten, um die optimalen Funktionalitäten und die Anwendbarkeit bei Offshore-Baustellen zu gewährleisten.

Zudem stellte sich ein schalloptimiertes Rammverfahren mit einem möglichst großen Rammhammer, eingesetzt bei ca. 50 bis 60% seiner Gesamtenergie, und einer erhöhten Schlagwiederholungsfrequenz als zuverlässige zusätzliche Schallminderungsmaßnahme zu den o. g. Schallschutzsystemen da.

1.4 Ausblick

Anwendungen mit technischen Schallschutzsystemen bei (Mono-) Pfahldurchmessern größer als 8 m und / oder Wassertiefen von > 40 m liegen derzeit weder in Deutschland, noch weltweit im Serieneinsatz vor. Somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich bei zukünftigen OWP-Vorhaben in größeren Wassertiefen und mit ggfs. größeren Durchmessern der Fundamentstrukturen Bedarf an Weiterentwicklung und Optimierung der technischen Schallminderungssysteme ergeben kann.

Dasselbe gilt für Bodeneigenschaften, die nicht der deutschen AWZ der Nordsee (vorwiegend Sand- und Tonschichtungen unterschiedlicher Mächtigkeit und Dichte) entsprechen. Bisher existieren nur sehr wenige Erfahrungen mit pfahlnahen Schallschutzsystemen in der Ostsee (Schlickgebiete, Sandablagerungen, gefolgt von Geschiebemergel und Kreideschichten unterschiedlicher Mächtigkeiten).

Zudem liegen weltweit nur sehr vereinzelte Erfahrungen mit der Anwendung von Schallschutzsystemen mit Strömungen > 0,75 m/s vor. Bei Anwendung eines Großen Blasenschleiers zeigt sich, dass stärkere Strömungen einen negativen Einfluss auf die resultierende Schallminderung haben. Welchen Einfluss starke Strömungen auf die Anwendbarkeit und die zu erzielende Schallminderung der beiden pfahlnahen Schallschutzsysteme haben, bleibt abzuwarten.

2. Aufgabenstellung und Ziele

Die akustische Belastung der Meere hat in den letzten Jahren durch schallintensive, menschliche Aktivitäten zugenommen. In Deutschland geben das Gesetz für die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) und das Gesetz zum Naturschutz und Landespflege (BNatSchG) den Rahmen für die Prüfung von erheblichen Auswirkungen und für die Festlegung von Maßnahmen zum Schutz von Arten und Habitaten vor.

Auf dem Hintergrund der Umsetzung der europäischen Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL, 2008) hat die Untersuchung von möglichen Auswirkungen des Schalleintrags auf die belebte Meeresumwelt auch international eine große Bedeutung.

Die derzeit am häufigsten genutzte Installationsmethode für Fundamentstrukturen in Offshore-Windparks (OWP) ist die Impulsrammung, bei der die Fundamentstrukturen mittels Hydraulikhammer, einem

Duales Lärmschutzkriterium	• frequenz-ungewichteter, breitbandiger Einzelereignispegel (SEL_{05} oder L_E) ≤ 160 dB (re 1 µ Pa^2s) und • Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) ≤ 190 dB (re 1 µ Pa),

sogenannten Rammhammer, in das Sediment (Meeresboden) eingeschlagen werden. Die dabei entstehenden Unterwasserschallimmissionen gelten als impulshafte Geräusche im Sinne der Meeresstrategie Rahmenrichtlinie (MSRL, Deskriptor 11.1). Durch die Rammarbeiten entstehen Schallimmissionen (Rammschall) im Wasserkörper, die für marine Säugetiere, insbesondere den schallsensitiven Schweinswal, potenziell schädigend sein können (vgl. Lucke et al., 2009).

In der Anordnung Nr. 14 zur Planfeststellung eines deutschen Offshore-Vorhabens setzt die deutsche Zulassungsbehörde BSH seit 2008 nach dem Vorsorgeprinzip duale Lärmschutzwerte auf Aktivitätsebene für impulshaltige, lärmintensive Schalleinträge in deutschen Gewässern fest, die in einer Entfernung von 750 m zur Rammstelle eingehalten werden müssen. Damit sollen temporäre Hörschwellenverschiebungen (engl. Temporal Threshold Shifts – TTS) bei marinen Säugetieren, vorwiegend Schweinswalen, vermieden werden. Seit 2011 ist der Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen zur Einhaltung der o. g. Lärmschutzwerte in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee vorgeschrieben.

Im Rahmen des angeordneten Baumonitorings – die Effizienzkontrolle der eingesetzten Schallschutzmaßnahmen– ist die Belastung unter Wasser durch Unterwasserschallmessungen bei jeder schallintensiven Arbeit zu erfassen und zu beurteilen, d. h. Unterwasserschallmessungen werden derzeit bei allen Fundamentgründungen im Impulsrammverfahren durchgeführt. Die Ergebnisse sind mit den o. g. Lärmschutzwerten zu vergleichen.

Die durchgeführten Unterwasserschallmessungen bei ungeminderten Impulsrammungen, sogenannte Referenzmessungen im Sinne der DIN SPEC 45653 (2017) ohne den Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen, haben in einer Entfernung von 750 m Messwerte von

Messerfahrungen	➢ 162 dB ≤ Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E) ≤ 183 dB ➢ 185 dB ≤ Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) ≤ 205 dB,

je nach Fundamentstruktur, eingesetzten Rammhammer und Rammenergie gezeigt, so dass i. d. R. umfängliche Schallminderungsmaßnahmen ergriffen werden müssen, um die o. g. Lärmschutzwerte verbindlich einzuhalten.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass weitere europäische Nationen, wie z. B. die Niederlande, Belgien oder Dänemark, ebenfalls Anforderungen im Umgang mit schallintensiven Aktivitäten erarbeitet haben. Somit ist der Umgang mit schallintensiven, impulshaltigen Aktivitäten und die Verwendung von Schallschutzsystemen und Schallminderungsmaßnahmen zunehmend eine internationale Aufgabe für zukünftige OWP-Betreiber geworden.

Zurzeit sind 18 Offshore-Windparks (OWP) in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nord- und Ostsee und drei OWPs innerhalb der 12-Seemeilen-Zone in Betrieb. Fünf OWPs befinden sich im Bau, wobei die schallintensive Installationsphase der OWEA-Fundamente bereits abgeschlossen ist. Weitere OWPs befinden sich in der Entwicklungsphase, um die Ausbauziele der Bundesregierung zu erreichen.

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist verantwortlich für die Zulassungsverfahren in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) und für die Überwachung der Einhaltung der o. g. Lärmschutzwerte. Zu diesem Zweck werden umfängliche Unterwasserschall-messungen in und um die errichteten OWPs im Rahmen des Baumonitorings in Anlehnung an die nationalen Messvorschriften (BSH, 2011 und BSH, 2013a) angeordnet. Die dabei erhobenen Daten, bestehend aus Rohdaten (Zeitaufnahmen) und prozessierten Ergebnisdaten der Unterwasserschallmessungen sowie Begleitinformationen (Metadaten) zu projektspezifischen und technisch-konstruktiven Eigenschaften jedes einzelnen OWP-Bauvorhabens, werden vom BSH in standardisierter Form gesammelt. Für die Haltung und die Nutzung dieser Daten entwickelte das BSH ein Fachinformationssystem für Unterwasserschall: das MarinEARS².

Das MarinEARS² ist seit 2016 in Betrieb und enthält sämtliche Unterwasserschallmessungen sowie umfängliche, standortspezifische und technisch-konstruktive Begleitinformationen (Metadaten), wie z. B. georeferenzierte Koordinaten, Rammprotokolle und die Anwendung von technischen Schallschutzmaßnahmen seit 2012 in der deutschen AWZ. Mittlerweile wurden Daten von > 1.000 Fundamentstrukturen und insgesamt fast 2.000 Einzelpfählen mit und ohne Schallminderungsmaßnahmen im MarinEARS² zusammengetragen und zur Qualitätssicherung überprüft. Basierend auf dieser Datenbank wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens projektübergreifende Auswertungen hinsichtlich

- der wesentlichen Einflussfaktoren für die Entstehung und die Weiterleitung von Rammschall im Wasser und
- der Wirksamkeit von eingesetzten, technischen, sekundären Schallminderungsmaßnahmen

durchgeführt, die in diesem Bericht zusammengefasst werden. Damit sollen die umfänglichen Erfahrungen aus den begleitenden Messungen bei der Anwendung von Schallschutzmaßnahmen während der Gründungsarbeiten von Offshore-Fundamenten mittels Impulsrammverfahren aus Deutschland projektübergreifend zusammengefasst und nutzbar gemacht werden.

Mit der projektübergreifenden Analyse von Unterwasserschallmessdaten und deren direkte Verknüpfung standortspezifischer und technisch-konstruktiver Begleitinformationen lassen sich zielgerichtet Informationen über mögliche Einflussfaktoren auf die Schallentstehung und gezielte Maßnahmen der Schallminderung aus der Praxis identifizieren. Derartige Erkenntnisse sind erforderlich für die behördliche Prüfung von naturschutzfachlich relevanten Aspekten im Zuge von Zulassungs- und Vollzugsverfahren. Ein Beispiel hierfür ist die naturschutzfachliche Bewertung von eingereichten Schallschutzkonzepten und Umsetzungsplänen vor Baubeginn zwecks Erstellung einer Baugenehmigung und deren technische Realisierung im Bauvorhaben.

Unabhängig von dem Vorteil auf Behördenseite kann auch die Wirtschaft und die Öffentlichkeit von diesen Erkenntnissen mittelbar profitieren, indem seitens der Behörden projektübergreifende Erkenntnisse für z. B. Öffentlichkeitsarbeiten und Normungen zur Verfügung gestellt werden können. Hiermit wird zudem für die Windparkentwickler und Betreiber eine projektübergreifende, umfassende und aktuelle Wissensgrundlage für die Planungssicherheit hinsichtlich der der Entwicklung von Schallschutzkonzepten für zukünftige Bauvorhaben bereitgestellt.

Ziel des Berichts ist es, einen Einblick in die wesentlichen standortspezifischen und technisch-konstruktiven Einflussfaktoren auf impulshaften Rammschall zu geben und die Erfahrungen mit der Anwendung von Schallminderungsmaßnahmen zusammenzufassen.

In Kapitel 3 werden die rechtlichen Vorgaben hinsichtlich impulshaltiger Schalleinträge ins Wasser zusammengefasst. Dieses Kapitel wurde seitens des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung gestellt.

In Kapitel 4 werden die wesentlichen akustischen Grundlagen für die Auswertung und die Bewertung von Unterwasserschall zusammengefasst.

Kapitel 5 widmet sich den impulshaltigen Unterwasserschalleinträgen (Rammschall) und deren wesentlichen Einflussfaktoren, die in standortspezifische und technisch-konstruktive Eigenschaften unterteilt wurden.

Kapitel 6 gibt einen Überblick über bereits bestehende und unter Offshore-Bedingungen angewendete technische, sekundäre Schallschutzsysteme. Im Folgenden werden jedoch nur die sekundären Schallschutzsysteme vorgestellt und diskutiert, die sich als offshore-tauglich im Serieneinsatz in deutschen Gewässern etabliert haben. Darüber hinaus werden die erzielten Schallminderungen der sekundären Schallschutzsysteme sowohl als breitbandige, als auch spektrale Einfügungsdämpfung dargestellt.

In Kapitel 7 wird die Effektivität der bereits am Markt verfügbaren, offshore-tauglichen Schallschutzsysteme hinsichtlich der Vermeidung von Schädigungen und Meidung bzw. Störung auf die marine Umwelt diskutiert. Zudem werden die Herausforderungen an zukünftige Schallschutzsysteme bzw. Schallminderungsmaßnahmen bei der Anwendung in zukünftigen OWP-Bauvorhaben mit voraussichtlich größeren Fundamentstrukturen und in größeren Wassertiefen diskutiert. Abschließend werden weitere Schallschutzmaßnahmen sowie alternative, schallarme Gründungsstrukturen und -verfahren, die vereinzelt in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee testweise eingesetzt wurden, hinsichtlich ihrer zu erwartenden Schalleinträge ins Wasser bzw. der erzielten Schallminderung kurz zusammengefasst.

3. Rechtliche Vorgaben zum Schutz der belebten Meeresumwelt von impulshaltigen Schalleintrag durch Rammarbeiten

In Deutschland gelten seit 2008 verbindliche Lärmschutzwerte für den Eintrag von Unterwasserschall durch Offshore-Rammarbeiten. Zum Schutz der belebten Meeresumwelt vor impulshaltigem Schalleintrag und zur Einhaltung der Lärmschutzwerte werden umfangreiche Schallschutzmaßnahmen, insbesondere auch technische Schallminderungssysteme eingesetzt.

Zuständig für die Zulassung und die Überwachung von Offshore-Vorhaben in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee ist das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Der Festlegung von verbindlichen Lärmschutzwerten in den Zulassungsbescheiden des BSH für Offshore-Vorhaben sind langjährige Forschungsarbeiten und fachliche Unterstützung durch die deutschen Fachbehörden – Umweltbundesamt (UBA) und Bundesamt für Naturschutz (BfN) – vorausgegangen. Die Forschung hat sich dabei einerseits mit rein physikalischen Aspekten des Unterwasserschalls und mit der Entwicklung von Standards für die Erfassung und Auswertung des impulshaltigen Schalleintrags sowie andererseits mit Wissensgenerierung in Hinblick auf Auswirkungen des Rammschalls auf die belebte Meeresumwelt befasst.

3.1 Entwicklung und Festlegung von verbindlichen Lärmschutzwerten für den Eintrag von Unterwasserschall bei Offshore-Rammarbeiten

Die Einführung von verbindlichen Lärmschutzwerten beruht auf Ergebnissen, die das Hervorrufen von temporärer Hörschwellenverschiebung mittels einer physikalischen Methode, der sogenannten, akustisch evozierten Potenziale (AEP) bei einem Schweinswal unter experimentellen Bedingungen durch Beschallung mit impulshaltiger Schallquelle gezeigt haben (Lucke et al., 2008, 2009).

In Zulassungsbescheiden des BSH wurde bereits seit 2004 als Ergebnis von Forschungsvorhaben der Richtwert von 160 dB re 1µPa s^2 für den Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E), der in 750 m Entfernung zu der Rammstelle anzustreben war, eingeführt. Parallel wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) weitere Forschungsvorhaben gefördert. Die Schwerpunkte der Forschung haben sich auf die Entwicklung von technischen Schallminderungssystemen und auf die Ermittlung von Schwellenwerten für physische Verletzung und Störung durch den Schalleintrag von Rammarbeiten konzentriert.

Nach der experimentellen Ermittlung einer physischen Verletzung in Form einer temporären Hörschwellenverschiebung (TTS) bei Schweinswalen hat das BSH ab 2008 in allen Zulassungsbescheiden verbindliche Grenzwerte für den Schalleintrag durch Rammarbeiten eingeführt.

Von 2008 bis 2011 hat das BSH in Abstimmung mit BMU, UBA und BfN aufgrund des Fehlens von technischen Maßnahmen nach Stand der Wissenschaft und Technik Rammarbeiten ohne technischen Schallschutz unter der Bedingung geduldet, dass sich die Industrie aktiv an der Forschung und der Entwicklung von Schallminderungssystemen beteiligt hat. Zwei Offshore-Windparks, das Testfeld *alpha ventus* und *BARD Offshore I*, wurden in dieser Phase errichtet. Beide Windparks haben durch Forschung und Entwicklung wesentlich zur Entwicklung von technischem Schallschutz beigetragen. Insbesondere sind hier die F&E-Vorhaben StUKplus[3] sowie die erste Phase von BORA[4] zu benennen.

Seit 2011 finden Rammarbeiten bei allen Bauprojekten in deutschen Gewässern unter der Anwendung von technischen Schallminderungssystemen statt. Allerdings war bis einschließlich 2013 ein Stand der Wissenschaft und Technik beim technischen Schallschutz nicht vorhanden. Das BSH hat aus diesem Grund in Abstimmung mit BMU, UBA und BfN die Überschreitung der Lärmschutzwerte unter strengen Auflagen geduldet. Der Schwerpunkt der Auflagen lag dabei auf der Weiterentwicklung und der Optimierung von technischen Schallminderungssystemen und auf der Wissensgenerierung für nachfolgende Bauprojekte.

Die umfangreiche Förderung im Rahmen von F&E-Verbundprojekten unter Beteiligung von Industrie und Forschung hat seit 2014 dazu geführt, dass technische Schallminderungssysteme zum Einsatz kommen, die einzeln oder in Kombination die Einhaltung der Grenzwerte verlässlich gewährleisten.

Die Anordnungen in Zulassungsbescheiden des BSH gelten für alle Offshore-Vorhaben (Windparks und Netzanbindungs-Plattformen) in der deutschen AWZ der Nordsee und Ostsee. Die Anordnungen gelten vorhabensübergreifend, geben den Rahmen für die Entwicklung von Konzepten zum Schallschutz vor und beinhalten Hinweise für die Umsetzung von Schallschutzmaßnahmen und derer Überwachung in der Bauphase. Die Reduzierung des Lärms an der Quelle sowie die Einschränkung der Beschallung von Habitaten sind strenge Maßnahmen, die dem Schutz der Schlüsselart Schweinswal und anderer Meerestierarten dienen und gleichzeitig der Industrie den erforderlichen festen Rahmen für die sichere Planung von Offshore-Vorhaben und Entwicklung von schallmindernden Technologien vorgeben.

Weitergehende Erläuterungen zu den naturschutzfachlichen Grundlagen finden sich in der Empfehlung des UBA (UBA, 2011) sowie in dem Schallschutzkonzept des BMU (BMU, 2013).

---

[3] StUKplus: Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben *alpha ventus* zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH, gefördert BMU und RAVE, FKZ 0327689A, Projektlaufzeit 05/2008 bis 04/2014 http://www.trianel-borkum.de/media/TWB/Downloads/Studien/2014_StUKplus-Endbericht _BSH-Koordination.pdf

[4] BORA: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Vorhersage des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten zur Gründung von OWEA, gefördert durch PTJ und BMWI, FKZ 0325421A/B/C, Projektlaufzeit 11/2011 bis 10/2015. https://bora.isd.uni-hannover.de/. Die Unterwasserschallmessungen wurden jeweils einmalig an einem Monopfahl, einem Tripod und einem Tripile als Fundamente für die OWEA mittels Impulsrammverfahren im Boden verankert; Abbildung 11 in Kapitel 5.2.1.

Das BSH folgt beim Schutz der belebten Meeresumwelt dem Vorsorgeprinzip und berücksichtigt den aktuellen Kenntnisstand sowie die fachlichen Anforderungen von BMU, UBA und BfN. Deshalb hat es folgende Festlegungen getroffen:

- Zum Schutz der belebten Meeresumwelt von impulshaltigen Schalleinträgen durch Rammarbeiten werden zwei Ziele verfolgt:
  - Reduzierung des Unterwasserschalleintrags an der Quelle,
  - Reduzierung des Habitatverlustes für Meerestierarten durch Meideverhalten.
- Die Schlüsselart in deutschen Gewässern der Nord- und Ostsee ist der Schweinwal (als streng geschützte Art nach BNatSchG).
- Temporäre Hörschwellenverschiebung des Schweinswals wird als Verletzung eingestuft.
- Zum Schutz des Schweinswals und der belebten Meeresumwelt von Auswirkungen des Rammschalls wird die Einhaltung von verbindlichen Lärmschutzwerten angeordnet.
- Die Einhaltung der festgelegten Lärmschutzwerte setzt den Einsatz von technischen Schallminderungssystemen voraus.
- Die Lärmschutzwerte basieren auf einem dualen Kriterium bestehend aus dem Einzelschallereignispegel (SEL) und dem Spitzenpegel ($L_{p,pk}$), beide gemessen in 750 m Entfernung zu der Rammstelle.
- Bei den Lärmschutzwerten handelt es sich bewusst um Breitband-Pegel (Einzahlwerte), die den erforderlichen Rahmen vorgeben, um technische Schallminderung für Offshore-Baustellen gezielt zu entwickeln und damit der Verwirklichung der Ziele zur Reduktion von Schalleintrag an der Quelle und der damit einhergehenden Reduktion von Habitatverlust beizutragen.
- Der mehrfachen Beschallung mit Rammschlägen pro Pfahl wird durch zwei zusätzlichen Maßnahmen Rechnung getragen:
  - Festlegung des Lärmschutzwertes bei 160 dB re 1 µPa s^2 einzuhalten durch den 5% Überschreitungspegel des Einzelereignispegels (SEL_{05}), mit 4 dB unter dem Pegel von 164 dB, bei dem experimentell eine temporäre Hörschwellenverschiebung (TTS) bei einem Schweinswal festgestellt wurde,
  - Festlegung des 5%-Überschreitungspegels (SEL_{05}) als Bezugsparameter für die Feststellung des Nachweises der Einhaltung der Lärmschutzwerte. Der SEL_{05} liegt mit mindestens 3 dB über dem Medianwert.
- Kumulative Effekte auf die Schlüsselart Schweinswal werden gemäß dem Schallschutzkonzept des BMU (2013) durch Einschränkung der Beschallung von Habitaten auf maximal erlaubten Flächenanteilen der AWZ und der Naturschutzgebiete vermieden oder vermindert.

3.2 Anordnungen zum Schallschutz in Zulassungsbescheiden für Offshore-Windparks und Plattformen in deutschen Gewässern

Die Zulassungsbescheide für Offshore-Vorhaben des BSH basieren auf den jeweiligen Berichten zu den voraussichtlichen Umweltauswirkungen des Vorhabens (**UVP-Bericht**) und berücksichtigen die Ergebnisse aus der Beteiligung gemäß UVPG und ESPOO-Konvention. Die für den Schallschutz relevanten Teile der UVP-Berichte in Zulassungsverfahren des BSH beinhalten folgende Aspekte:

- Beschreibung und Bewertung des Vorkommens von schallsensitiven Tierarten, insbesondere Schweinswale, Robben und Fische aufgrund der Ergebnisse aus den standardisierten Untersuchungen nach StUK im Rahmen der Basisaufnahme oder des Monitorings von bereits realisierten Vorhaben,
- Beschreibung und Bewertung der schallbezogenen Auswirkungen auf die belebte Meeresumwelt durch die Errichtung und den Betrieb der Anlagen,
- Prognose der zu erwartenden Schallemissionen durch Rammarbeiten anhand von empirischen oder numerischen Modellen,
- Beschreibung von artenschutzrechtlich relevanten Auswirkungen gemäß den Vorgaben aus BNatSchG,
- Beschreibung der gebietsschutzrechtlichen Auswirkungen gemäß den Vorgaben aus BNatSchG,
- Beschreibung von Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von erheblichen Auswirkungen durch Schalleintrag zum Schutz der Meeresumwelt im Einklang mit Anforderungen aus nationalem Recht (UVPG, BNatSchG) als Umsetzung von europäischem Recht (FFH-RL, MSRL) sowie Anforderungen von Übereinkommen und Konventionen (insbesondere OSPAR, HELCOM, ASCOBANS),
- Beschreibung von Maßnahmen zur Überwachung von Auswirkungen auf die belebte Meeresumwelt nach nationalen und internationalen Standards.

Die Zulassungsbescheide des BSH beinhalten **zwei Anordnungen zum Schutz der Meeresumwelt von Schalleinträgen durch Rammarbeiten**:

a) **Reduzierung des Schalleintrags an der Quelle:** Verbindlicher Einsatz von geräuscharmen Arbeitsmethoden nach dem Stand der Technik bei der Einbringung von Gründungspfählen und verbindliche Einschränkung der Schallemissionen bei Rammarbeiten. Die Anordnung dient vorrangig dem Schutz mariner Tierarten von impulshaltigen Schalleinträgen durch Vermeidung von Tötungen und Verletzungen.

b) **Vermeidung von erheblichen kumulativen Auswirkungen:** Die Ausbreitung der Schallemissionen darf definierte Flächenanteile der deutschen AWZ und der Naturschutzgebiete nicht überschreiten. Es wird dadurch sichergestellt, dass den Tieren zu jeder Zeit ausreichend hochwertige Habitate zum Ausweichen zur Verfügung stehen. Die Anordnung dient vorrangig dem

Schutz mariner Habitate durch Vermeidung und Minimierung von Störungen durch impulshaltigem Schalleintrag.

Die Anordnungen ermöglichen die sichere Planung von Offshore-Vorhaben für die Industrie und gewährleisten die Gleichbehandlung aller Offshore-Vorhaben.

Unter der **Anordnung a)** werden u.a. folgende Regelungen getroffen:

- Eine **Arbeitsmethode, die nach dem Stand der Technik** und nach den vorgefundenen Umständen so geräuscharm wie möglich erscheint, ist für die Gründung und Installation der Anlagen zu verwenden. Sprengungen sind nicht gestattet.
- Die **Schallemission** (Einzelereignispegel SEL_{05}) darf in einer Entfernung von 750 m 160 Dezibel (dB re 1 µPa s²) und der Spitzenschalldruckpegel 190 Dezibel (dB re 1 µPa) nicht überschreiten. Sprengungen sind zu unterlassen.
- Die **Dauer der Rammarbeiten** pro Monopfahl soll in der Regel 180 min, für Jacket-Pfahl 140 min nicht überschreiten. Dies schließt (1) die Vergrämung mittels Pinger, Seal Scarer System oder FaunaGuard System, (2) die Soft-Start Prozedur einschließlich der Ermittlung der Vertikalität des zu rammenden Pfahls und (3) die Rammung bis zur Einbindetiefe ein.
- Ein **Schallschutzkonzept** ist auf Basis der konkret festgelegten Gründungsstrukturen und des geplanten Errichtungsprozesses zu entwickeln und mit den Unterlagen der 2. Freigabe vorzugsweise zwei Jahre vor Beginn der Errichtung dem BSH zur Abstimmung einzureichen.
- Der **Umsetzungsplan** der schallminimierenden und schallverhütenden Maßnahmen, die im Rahmen der Abstimmung des Schallschutzkonzeptes von den Behörden festgelegt wurden, ist dem BSH spätestens sechs Monate vor Baubeginn zur Abstimmung einzureichen.
- Die **Prognose** der zu erwartenden Schalleinträge durch Rammarbeiten ist anhand von empirischen oder numerischen Modellen im Rahmen des Schallschutzkonzeptes zu aktualisieren und für die Auswahl der technischen Schallminderungsmaßnahmen zugrunde zu legen.
- **Technische Schallminderungssysteme** nach dem Stand der Wissenschaft und Technik sind zur Einhaltung der Lärmschutzwerte einzeln oder in Kombination einzuplanen und mit den Behörden abzustimmen.
- **Offshore–Tests** sind vor Baubeginn unter vergleichbaren Offshore-Bedingungen durchzuführen, sofern die ausgewählte Schallminderungsmaßnahme noch nicht als Stand der Technik gilt und noch nicht in vergleichbarer Weise erprobt worden ist. Die Dokumentation über die Erprobung ist dem BSH mindestens drei Monate vor Baubeginn vorzulegen.
- Schallverhütende Maßnahmen, wie **Soft-Start** und **Vergrämung** zum Schutz von Tieren, die sich in der Umgebung der Rammstelle aufhalten, sind im Rahmen des Schallschutzkonzeptes einzuplanen und mit den Behörden abzustimmen.
- Die **Effektivität der schallschützenden und schallmindernden Maßnahmen** ist mittels Messungen zu begleiten und zu dokumentieren.

- Ein **Messkonzept** zur Überwachung der Effektivität der Maßnahmen ist bereits mit dem Schallschutzkonzept zur Abstimmung einzureichen und im Rahmen des Umsetzungsplans weiter zu konkretisieren.
- Bei der Aufstellung des Messkonzeptes für die Überwachung des Unterwasser-Schalleintrags ist die **„Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen" des BSH (2011) und die ISO Norm 18406 (2017)** zu beachten. Zu messen ist der baubedingte Schalleintrag durch Bauschiffe und Rammarbeiten. Während der Durchführung der schallintensiven Arbeiten sind Messungen des Unterwasserschalls in Entfernungen von 750 m, 1.500 m zur Rammstelle und im nächstgelegenen Naturschutzgebiet vorzunehmen und in geeigneter Weise zu dokumentieren.
- Die Wirksamkeit der zum Einsatz kommenden Schallminderungssysteme ist gemäß der Anleitung des **BSH (2013) „Messvorschrift zur Bestimmung der Wirksamkeit von Schallminderungssystemen" und der DIN SPEC 45653 (2017)** darzustellen.
- Schadensverhütende und schallminimierende Maßnahmen sind zusätzlich während der Arbeiten durch den **Einsatz von temporär ausgebrachten Schweinswaldetektoren – PODs** oder vergleichbare Systeme – auf ihre Effizienz hin zu überprüfen. Die akustische Erfassung der Aktivität des Schweinswals und die Erfassung des Schalleintrags sind an den gleichen Messstellen durchzuführen.
- Die Ergebnisse aus den Messungen sind zwecks Prüfung dem BSH in Form von **Berichten** kurzfristig (24 Stunden nach der Gründung eines Pfahls) einzureichen. Die Intervalle und Formate, in denen Messberichte und Messergebnisse in der Folge übermittelt werden, sind im Rahmen des Vollzugs mit dem BSH abzustimmen.
- Das BSH behält sich ausdrücklich vor, zur Erreichung der Lärmschutzwerte bzw. der zeitlichen Vorgabe **technische Nachbesserungen** zu fordern.

Unter der **Anordnung b)** werden u.a. Regelungen zur Vermeidung und Verminderung von erheblichen kumulativen Auswirkungen bzw. Störungen des Bestands des Schweinswals, die durch impulshaltigen Schalleinträgen verursacht werden können, getroffen. Die Regelungen leiten sich aus den Konzept des BMU zum Schutz des Schweinswals in der deutschen AWZ der Nordsee ab (BMU, 2013).

- Es ist mit der erforderlichen Sicherheit zu gewährleisten, dass zu jedem Zeitpunkt nicht mehr als **10% der Fläche der deutschen AWZ der Nordsee** und nicht mehr als **10% eines benachbarten Naturschutzgebietes** von schallintensiven Rammarbeiten für die Gründung der Pfähle von störungsauslösenden Schalleinträgen betroffen sind.
- In der sensiblen Zeit des Schweinswals von 1. Mai bis zum 31. August ist es mit der erforderlichen Sicherheit zu gewährleisten, dass **nicht mehr als 1% des Teilbereichs I des Naturschutzgebietes „Sylter Außenriff – Östliche Deutsche Bucht" mit der besonderen Funktion als Aufzuchtsgebiet** von schallintensiven Rammarbeiten für die Gründung der Pfähle von störungsauslösenden Schalleinträgen betroffen ist.

Um den Schutz mariner Habitate zu gewährleisten können gemäß dem Schallschutzkonzept des BMU (2013) in Abhängigkeit von der Lage eines Projektes in der deutschen AWZ bzw. von seiner Nähe zu Naturschutzgebieten zusätzliche Maßnahmen während der Gründungsarbeiten erforderlich werden. Zusätzliche Maßnahmen werden im Rahmen der dritten Baufreigabe vom BSH unter Berücksichtigung der standort- und projektspezifischen Eigenschaften erlassen.

3.3 Umsetzung von Schallschutzmaßnahmen in Bauprojekten in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee

Im Rahmen der 3. Baufreigabe legt das BSH auf der Basis des abgestimmten Umsetzungsplans konkretisierende Maßgaben zum Schutz vor Rammschall fest. Die schallschutzbezogenen Maßgaben berücksichtigen die jeweiligen standort- und anlagenspezifischen Eigenschaften des Bauvorhabens. Die 3. Baufreigabe wird vom BSH stets in angemessenen Tranchen erteilt. Auf diese Weise behält sich das BSH die Möglichkeit vor, die Ergebnisse aus der Überwachung unter Beteiligung des BfN zu bewerten und bei Bedarf die Maßgaben anzupassen bzw. Optimierung der Schallminderungsmaßnahmen anzuordnen. Die Erweiterung der 3. Baufreigabe hängt u.a. von dem Erfolg der Schallminderungsmaßnahmen und der Einhaltung der Lärmschutzwerte ab.

Mit der Installation der Pfähle darf erst begonnen werden, wenn der Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der Betriebsbereitschaft der Schallminderungssysteme erbracht ist.

Die schallschutzbezogenen Maßgaben decken alle Aspekte ab, die auf den effektiven Schutz der Tiere vor Rammschall Einfluss haben sowie Installationskomponenten, die Intensität und Dauer des Eintrags von Rammschall beeinflussen.

Im Folgenden werden wesentliche Aspekte der schallschutzbezogenen Maßgaben der 3. Baufreigabe aus Vorhaben der Jahre 2017 bis 2019 zusammengefasst.

Schutz der Tiere in der Umgebung der Rammstelle:

- Vor Beginn der Rammarbeiten und vor der Inbetriebnahme des Blasenschleiersystems werden Schweinswale aus dem Gefährdungsbereich mittels Fauna Guard-System vergrämt.
- Die Rammung ist stets mit einem Soft-Start zu beginnen.
- Die Effektivität der Vergrämung ist durch akustische Erfassung der Schweinswalaktivität mittels PODs zu überwachen.

Rammverfahren:

- **Rammhammer:** Baujahr und Typ des Hammers werden registriert. Aufgrund der aktuellen Pfahldesigns (Durchmesser, Länge und Einbindetiefe) werden Hämmer der neuen Generation mit Kapazität > 3000 kJ eingesetzt. Dabei ist
  - die Einsatzhistorie des einzusetzenden Rammhammers und
  - das Rammprotokoll nach jeder Rammung im Original vorzulegen.
- Ein **schalloptimiertes Rammverfahren** ist anzuwenden. Hierzu wird erwartet, dass der Hammer technisch in der Lage ist, schnell zu beschleunigen, wenn erforderlich auch bei hoher Energie mit hoher Schlagfrequenz zu arbeiten, und eine Steuerung des Rammprozesses in Anlehnung an der Bodenbeschaffenheit und die Ergebnisse aus der Online-Überwachung des Schallpegels zulässt.
- Die maximal einzusetzende **Rammenergie** ist auf 50 % bis 60% der Kapazität des Hammers beschränkt. Es ist dabei sicherzustellen, dass die Einbindetiefe erreicht wird. Eine Erhöhung der Rammenergie ist nach Prüfung von Rammprotokollen und Ergebnissen aus Schallmessungen möglich.
- Die maximale Rammdauer pro Monopfahl einschließlich der Vergrämung darf 180 min nicht überschreiten. Bei Jacket-Pfählen ist die Rammdauer auf 140 min begrenzt.
- **Messung der Vertikalität des zu rammenden Pfahls:** Es ist durch geeignete Messsysteme sicherzustellen, dass die Prüfung der Vertikalität ohne langanhaltende Unterbrechungen durchgeführt werden können.

Technische Schallminderungssysteme

Bauvorhaben in Wassertiefen > 25 m und mit Pfahldurchmessern > 6 m sind gehalten, **eine Kombination aus pfahlnahen und pfahlfernen Schallminderungssystemen** einzusetzen.

Den Stand der Technik haben bisher drei Schallminderungssysteme erreicht: (i) das große Blasenschleiersystem, (ii) das HSD-System und das (iii) IHC – NMS. Das Schallreduktionspotenzial von neuen technischen Systemen nach Stand der Wissenschaft und Technik ist unter Offshore-Bedingungen nachzuweisen. Neue Schallminderungssysteme können daher nur nach erfolgreichen Offshore-Tests mit einer fachgerechten Evaluation des Schallminderungspotenzials für den Einsatz zugelassen werden.

Aus den drei Schallminderungssystemen, die den Stand der Technik erreicht haben, wird nur für das IHC – NMS kein systemrelevanten Offshore-Test vor Beginn der Installation eines Vorhabens angeordnet. Dies hängt mit der Integration des Systems im Installationsprozess und seinen multiplen Funktionalitäten zusammen. Systemrelevante Offshore-Tests werden vor Beginn der Installation regelmäßig für Blasenschleiersysteme sowie für das pfahlnahe System HSD aufgrund der projektspezifischen und technisch-konstruktiven Ausführungen folgendermaßen angeordnet:

Großes Blasenschleiersystem:

- Offshore-Tests vor Beginn der Installation:
  - die Auslegung auf den Meeresboden ist mittels Seitensichtsonar zu überprüfen.
  - Es ist ein Testlauf der Kompressoren durchzuführen und zu dokumentieren.
  - Ggf. sind Betriebsergebnisse durch Aufnahmen mit Drohnen zu dokumentieren.
- Technische Ausführung:
  - Es sind neue Düsenschläuche anzuwenden und die Anwendungshistorie der Düsenschläuche stets zu dokumentieren.
  - Die Länge eines einzelnen (einfachen) Großen Blasenschleiers (BBC) ist auf 750 m begrenzt. Für einen doppelten Großen Blasenschleier (DBBC) ist eine Länge von 1.000 m für den äußeren Düsenschlauch zulässig.
  - Die Luftmenge soll mindestens 0,5 m^3/(min m) betragen.
  - Die Verlegegenauigkeit der am Meeresboden ausgelegten Düsenschläuche ist zu Beginn der Rammarbeiten mehrfach zu messen und zu dokumentieren.
  - Es sind baugleiche Kompressoren der neuesten Generation einzusetzen, die ölfreie, komprimierte Luft produzieren. Die Gesamtanzahl aller Kompressoren ist aus Gründen des CO2-Ausstoßes auf 20 (zzgl. 2 Ersatz-Kompressoren) begrenzt.
  - Der Betrieb der eingesetzten Kompressoren ist zu dokumentieren.

HSD-System:

Das System wird im Rahmen des jeweiligen Bauvorhabens in einer für das Installationsverfahren geeigneten technischen Ausführung bereitgestellt. Die Funktionstüchtigkeit, insbesondere das Herabsetzen der Ballastbox auf den Boden und das Einholen, sind vor Beginn der Installation durch **Hafen- und Offshore-Tests** nachzuweisen.

Überwachung der Effektivität der Schallminderung:

Unterwasserschallmessungen sind in 750 m und in 1.500 m Entfernung zu der Rammstelle sowie in dem nächstgelegenen Naturschutzgebiet durchzuführen:

- Die Einhaltung der Lärmschutzwerte ist durch Messungen des Unterwasserschalls nachzuweisen.
- Die Aufnahme und die Auswertung von Unterwasserschallmessungen sind während der Rammarbeiten für alle Fundamente gemäß BSH (2011) und der ISO 18406 (2017) durchzuführen.
- Mit der Installation der Monopfähle oder Jacket-Pfähle darf erst begonnen werden, wenn die Erbringung des Eignungsnachweises, der für die Aufnahme und Auswertung des Unterwasserschalls verantwortlicher Institution erfolgt ist. Die Eignung ist über eine Akkreditierung nach

DIN EN ISO/IEC 17025 im Hinblick auf die ISO18406 (2017) und die DIN SPEC 45653 (2017) nachzuweisen,

- Eine fachliche Qualitätskontrolle der Ergebnisse aus den Messungen kann stichprobenartig oder in begründeten Fällen gänzlich durch externe Gutachter angeordnet werden.
- Die Protokolle aus den Rammarbeiten und aus der Schallminderung sind ohne zeitliche Verzögerung nach Beendigung der Installation eine s Monopfahls oder eines Jackets dem BSH einzureichen.
- Die prozessierten Daten der Unterwasserschallmessungen sind ohne zeitliche Verzögerung über das Internet-Portal MarinEARS hochzuladen,
- Die Rohdaten sind dem BSH zwecks Speicherung einzureichen. Die Weitergabe von Rohdaten an Dritten ist nicht gestattet.

Bestimmung der Wirksamkeit der Schallminderung:

- Referenz- und Testmessungen zur Bestimmung des Ausgangspegels und Evaluierung der Wirksamkeit der Schallminderungssysteme sind unter Berücksichtigung der DIN SPEC 45653 (2017) zu beantragen und durchzuführen.
- Die Referenz- und Testmessungen sind zwecks Optimierung der Schallminderung in der frühen Phase der Installation einzuplanen.
- Referenzmessungen ohne den Einsatz der Schallminderungssysteme sind in der deutschen AWZ der Nordsee nur außerhalb der Zeit vom 01.05. bis 31.08. bzw. in der deutschen AWZ der Ostsee nur außerhalb der Zeit vom 01.11. bis zum 31.03. gestattet.
- Die Bewertung des Schallreduktionspotenzials der Schallminderungssysteme ist verbindlich gemäß der Messvorschrift des BSH zur Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßnahmen von 2013 und der DIN SPEC 45653 (2017) zu analysieren und in einem separaten Erfahrungsbericht darzustellen.

Koordinierung von Rammarbeiten:

Die Koordinierung der Rammarbeiten mit benachbarten Vorhaben ist vorrangig sicherzustellen und zu dokumentieren und etwaige Maßnahmen mit dem BSH abzustimmen. Durch die Koordinierung ist sicherzustellen, die Vorgaben der Anordnung zum Schutz der Lebensräume des Schweinswals eingehalten werden.

4. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die dem Umgebungsdruck (im Wasser dem hydrostatischen Druck) additiv überlagert ist. Dabei handelt es sich um eine Schwingung der Wasserteilchen, die üblicherweise durch deren Geschwindigkeit, der sogenannten Schallschnelle v (engl. particle velocity) beschrieben wird. Die Schallschnelle kennzeichnet die Wechselgeschwindigkeit eines um seine Ruheposition in einem Medium schwingenden Teilchens. Die Schallschnelle ist nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit c, also der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in einem Medium, die in der Regel bei Wasser im Bereich von c_{Wasser} = 1.500 m/s liegt. Die Schallschnelle v ist deutlich geringer als die Schallgeschwindigkeit c.

Schalldruck p und Schallschnelle v stehen mit der akustischen Kennimpedanz Z, die den Wellenwiderstand des Mediums charakterisiert, in folgendem Zusammenhang:

$$Z = \frac{p}{v} \qquad \textit{Gl. 1}$$

Im Fernfeld, d. h. in einigen Wellenlängen Abstand[5] (frequenzabhängig) von der Schallquelle, ist die Kennimpedanz gegeben durch:

$$Z = \rho \cdot c \qquad \textit{Gl. 2}$$

mit ρ – Dichte des Mediums

und c – Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Für eine Schalldruckamplitude von beispielsweise 1 Pa (entspricht bei einem sinusförmigen Signal einem Schalldruckpegel von 117 dB re 1 µPa bzw. einem Spitzenpegel von 120 dB re 1 µPa) ergibt sich daraus für die Schallschnelle in Wasser ein Wert von ca. 0,7 µm/s.

4.1 Pegelgrößen

In der Akustik wird die Intensität von Geräuschen in der Regel nicht direkt durch die Messgröße Schalldruck (oder Schallschnelle) beschrieben, sondern durch den aus der Nachrichtentechnik bekannten Pegel in Dezibel (dB).

Allerdings gibt es verschiedene Schallpegelgrößen:

[5] Die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld ist für Unterwasserschall nicht genau definiert, hängt jedoch von der Wellenlänge λ ab. In Luftschall wird ein Wert von $\geq 2\lambda$ angenommen. Für Unterwasserschall existieren Angaben von bis zu $\geq 5\lambda$.

- (Energie-) äquivalenter Dauerschallpegel SPL,
- Einzelereignispegel[6] SEL bzw. L_E ,
- Spitzenpegel $L_{p,pk}$.(zero-to-peak).

Der SPL und der SEL bzw. L_E können sowohl frequenzunabhängig angegeben werden, d. h. als breitbandige Einzahlwerte, als auch frequenzaufgelöst, z. B. in 1/3-Oktav-Bändern (Terzspektrum).

Im Folgenden werden die o. g. Pegelgrößen beschrieben.

4.1.1 (Energie-) äquivalenter Dauerschallpegel SPL (engl. Sound Pressure Level)

Der Dauerschallpegel SPL ist die gebräuchlichste Messgröße in der Akustik und ist definiert als

$$\mathrm{SPL} = 10\log\left(\frac{1}{T}\int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2}dt\right) \text{ [dB re 1 µPa²]} \qquad \textit{Gl. 3}$$

mit

$p(t)$ – zeitlich varianter Schalldruck,

p_0 – Bezugsschalldruck (bei Unterwasserschall 1 µPa),

T – Mittelungszeit.

4.1.2 Einzelereignispegel (L_E; engl. Sound Exposure Level - SEL)

Zur Charakterisierung von Rammgeräuschen ist der Dauerschallpegel (SPL) allein kein ausreichendes Maß, da er nicht nur von der Stärke der Rammschläge abhängt, sondern auch von der Mittelungszeit und von den Pausen zwischen den Rammschlägen. Besser geeignet ist der Einzelereignispegel SEL bzw. L_E , der folgendermaßen definiert ist:

$$\mathrm{SEL} = 10\log\left(\frac{1}{T_0}\int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2}dt\right) \text{ [dB re 1 µPa²s]} \qquad \textit{Gl. 4}$$

mit

T_1 und T_2 – Anfangs- bzw. Endzeit der Mittelungen (so zu wählen, dass das Schallereignis zwischen T_1 und T_2 liegt (Abbildung 1)),

[6] In der ISO 18406 (2017) wird der Einzelereignispegel (engl. Sound Exposure Level) mit SEL abgekürzt. Die deutsche Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH, 2011) hat die Abkürzung L_E eingefügt. Basierend auf den Definitionen entspricht der SEL dem L_E und kann synonym verwendet werden.

T_0 – 1 Sekunde.

Der Einzelereignispegel eines Schallimpulses (Rammschlag) entspricht somit dem Dauerschallpegel (SPL) eines kontinuierlichen Schalls von 1 s Dauer und der gleichen Schallenergie wie der Impuls.

Der Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E) und der Dauerschallpegel (SPL) können ineinander umgerechnet werden:

$$\text{SEL} = 10\log\left(10^{SPL/10} - 10^{L_{hg}/10}\right) - 10\log\frac{nT_0}{T} \text{ [dB re 1 µPa²s]} \qquad \textit{Gl. 5}$$

mit

n – Anzahl der Schallereignisse, also der Rammschläge, innerhalb der Zeit *T*,
T_0 – 1 Sekunde,
L_{hg} – Stör- bzw. Hintergrundpegel zwischen den einzelnen Rammschlägen.

Gleichung 5 liefert somit den mittleren Einzelereignispegel (SEL) von n Schallereignissen (Rammschlägen) aus nur einer Schalldruckpegel (SPL)-Messung über eine definierte Messdauer.

Im Falle, dass der Hintergrundpegel zwischen den Rammschlägen deutlich geringer als der Rammschall ist (Signal-Rausch-Abstand ≥ 10 dB, engl. signal-to-noise-ratio – SNR), kann nach der ISO 18406 (2017) und der deutschen Messvorschrift (BSH, 2011) mit hinreichender Genauigkeit ein mittlerer Einzelereignispegel über einen definierten Zeitraum, z. B. 30 s, folgendermaßen bestimmt werden:

$$\text{SEL} \approx \text{SPL} \; - 10\log\frac{nT_0}{T} \text{ [dB re 1 µPa²s]} \qquad \textit{Gl. 6}$$

4.1.3 Spitzenpegel $L_{p,pk}$ (engl. peak Sound Pressure Level or zero-to-peak Sound Pressure Level)

Der Spitzenpegel $L_{p,pk}$ ist ein Maß für kurzzeitige Schalldruckmaxima. Im Gegensatz zum Schalldruckpegel (SPL) und Einzelereignispegel (SEL) gibt es keine Mittelwertbildung:

$$L_{p,pk} = 20\log\left(\frac{|\,p_{peak}\,|}{p_0}\right) \text{ [dB re 1 µPa]} \qquad \textit{Gl. 7}$$

mit

p_{peak} – maximaler, positiver oder negativer Schalldruck.

In Abbildung 1 ist ein Beispiel dargestellt. Der Spitzenpegel $L_{p,pk}$ ist stets höher als der Einzelereignispegel (SEL). In der Regel beträgt der Unterschied zwischen dem Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und dem Einzelereignispegel (SEL) bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB.

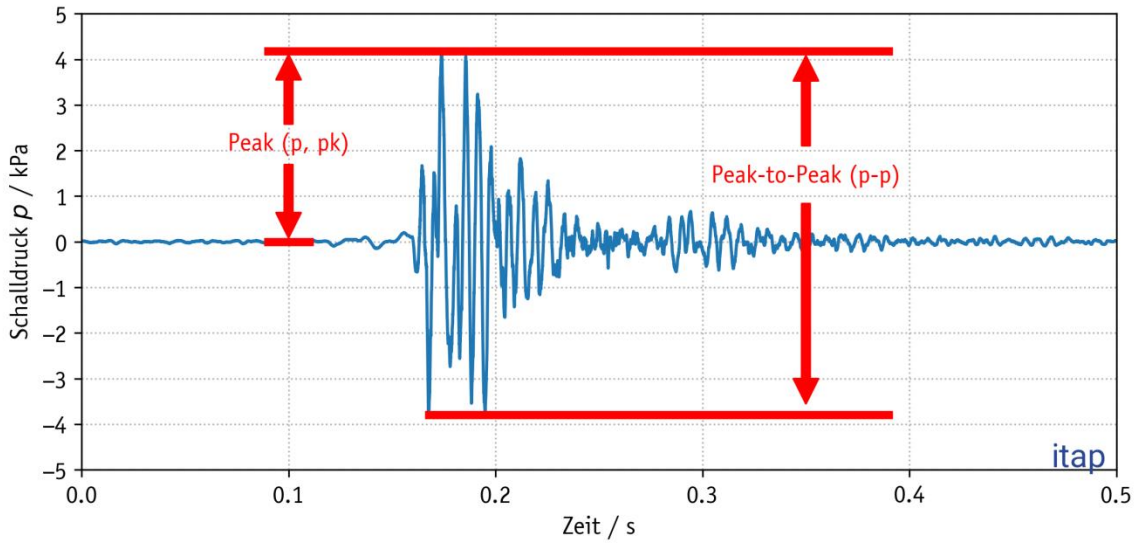


Abbildung 1: *Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei Rammungen in einer Entfernung von einigen 100 m.*

4.2 Anforderung an Unterwasserschallmessungen

Das BSH veröffentlichte 2011 eine Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen beim Bau von Offshore-Windparks (BSH, 2011). Insbesondere der Bau von Gründungsstrukturen mittels Impulsrammverfahren (Rammschall) und deren messtechnische Erfassung, Auswertung und Dokumentation des Unterwasserschalleintrags wird darin für deutsche Gewässer erstmalig standardisiert. Zuvor existierten weder nationale, noch internationale Richtlinien oder Standards. Die Messvorschrift sieht in Verbindung mit der StUK 4 (2013) vor, dass bei jeder schallintensiven Impulsrammung eine Unterwasserschallmessung in Abständen von 750 m, 1.500 m und im nächstgelegenen Schutzgebiet nach Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie – FFH (engl. Special Area of Conservation – SAC) durchgeführt und dokumentiert werden muss.

Die Messungen in 750 m dienen dem Vergleich mit den definierten Lärmschutzwertkriterien; siehe Kapitel 3. Die Messungen in 1.500 m können als Validierungsmaßnahme oder im Falle, dass die Messungen in 750 m fehlgeschlagen sind, als Ersatzmessungen dienen. Der minimale Messabstand von 750 m basiert auf den zumeist notwendigen Sicherheitsradien großer Bauschiffe und der Tatsache, dass man sich in 750 m Entfernung zur Quelle definitiv im akustischen Fernfeld befindet.

Die Messvorschrift (BSH, 2011) beinhaltet eine technische Beschreibung zur Auswertung von impulshaltigen Unterwasserschallmessungen; siehe Kapitel 4.1. Es hat insbesondere eine statistische Darstellung des Einzelereignispegels über die komplette Impulsrammung pro Pfahl zu erfolgen; siehe Kapitel 4.3.

Bei Messungen im Abstand von 750 m und 1.500 m zur Impulsrammung ist grundsätzlich davon auszugehen, dass der Signal-Rausch-Abstand zwischen dem impulshaltigen Rammschall und dem permanenten Hintergrundschall (Dauerschall) mindestens 10 dB beträgt und die beiden Messergebnisse in flachen Gewässern, wie der deutschen Nord- und Ostsee überschlägig mittels der geometrischen Ausbreitungsfunktion $15*\log_{10}$ (Abstandsverhältnis) verglichen werden können; siehe Kapitel 5.1.5.

Die Messungen im nächstgelegenen FFH-Schutzgeiet (zumeist in mehreren Kilometern Entfernung) dienen der Erfassung der akustischen Belastung innerhalb dieser naturschutzrechtlichen, sensitiven Gebiete. Je nach Abstand dieser Messposition zur Quelle und je nach Wirksamkeit des eingesetzten Schallschutzkonzepts ist i. d. R. der Signal-Rausch-Abstand zumeist < 10 dB, so dass sich der impulshaltige Rammschall nicht mehr signifikant vom Hintergrundschall trennen lässt. Dies hat ggf. zur Folge, dass kein Einzelereignispegel mehr berechenbar ist, sondern lediglich der Schalldruckpegel berechnet werden kann.

Aufgrund der Erfahrungen bei der Anwendung von technischen Schallschutzsystemen wurde 2013 zudem eine Messvorschrift für die Erfassung und die Evaluation von Schallschutzsystemen, basierend auf den Erfahrungen aus einem F&E-Vorhaben (Diederichs et al., 2014), entwickelt (BSH, 2013a). Dabei sind für die Evaluation der eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen Impulsrammungen jeweils mit und ohne Schallschutzmaßnahme notwendig. Messungen in unterschiedlichen Raumrichtungen dienen dabei zur Evaluation der Richtungsabhängigkeit des eingesetzten Schallschutzsystems. Diese Messvorschrift (BSH, 2013a) wurde 2017 in eine Spezifikation der Deutschen Normungsstelle DIN überführt (DIN SPEC 45653, 2017).

Mit der ISO 18405 (2017) wurde erstmalig die Terminologie für Unterwasserschall standardisiert. Darauf aufbauend wurde mit der ISO 18406 (2017) ein erster internationaler Standard für die Erfassung, Auswertung und Dokumentation von impulshaltigen Unterwasserschallereignissen beim Impulsrammverfahren in flachen Gewässern definiert. Basierend auf den bereits bestehenden Messerfahrungen aus Deutschland wurde als Mindestanforderung eine Messung in einem Abstand von 750 m spezifiziert. Zudem stimmen die Rahmenbedingungen für die Auswertungen der ISO 18406 (2017) mit denen der deutschen Messvorschrift (BSH, 2011) überein.

4.3 Standardisierte Auswertung und Sammlung von Unterwasserschallmessungen im Fachinformationssystem MarinEARS[2]

Die Bestimmung der Einzelereignispegel erfolgt i. d. R. in einer Einzelschlaganalyse nach den Vorgaben der Messvorschrift für Unterwasserschall (BSH, 2011) bzw. der ISO 18406 (2017), bei dem jeder Impuls einzeln analysiert wird, sobald der Signal-Rausch-Abstand ≥ 10 dB ist. Für die Darstellung der Ergebnisse werden die Terzspektren (IEC 61260) auf den Frequenzbereich von 12,5 Hz bis 16 oder 20 kHz beschränkt.

> *Technische Anmerkung:* Es ist auch eine vereinfachte Auswertung über die Ermittlung des energie-äquivalenten Dauerschallpegels $L_{eq,\ 30s}$ über 30 s und einer Teilung durch die Anzahl der in diesem Zeitraum erfassten Einzelrammschläge möglich (BSH, 2011 und Gleichung 6). Diese Auswertungsmethode liefert allerdings einen gemittelten Einzelereignispegel über 30 s. Im Falle von stark unterschiedlichen Rammschlagenergien und keiner kontinuierlichen Rammung, d. h. Schlagwiederholungsfrequenzen < 25 Schläge pro Minute, können Standardabweichungen im Dezibel-Bereich auftreten; bei einer kontinuierlichen Rammung mit vergleichbarer Rammenergie liegt die Standardabweichung zumeist bei << 1 dB.

Zur Dokumentation und Bewertung von Rammschall werden die folgenden Kenngrößen in Anlehnung an die Messvorschrift des BSH (2011) aufgeführt:

- SPL_{5s}: energetischer Mittelwert des Dauerschallpegels über 5 Sekunden,
- SEL_{90} bzw. L_{90}: Überschreitungspegel der Einzelschlaganalyse des Einzelereignispegels, der bei 90 % aller Rammschläge über das betrachtete Zeitintervall überschritten wurde,
- SEL_{50} bzw. L_{50}: Überschreitungspegel der Einzelschlaganalyse des Einzelereignispegels, der bei 50 % aller Rammschläge über das betrachtete Zeitintervall überschritten wurde,
- SEL_{05} bzw. L_{05}: Überschreitungspegel der Einzelschlaganalyse des Einzelereignispegels, der bei 5 % aller Rammschläge über das betrachtete Zeitintervall überschritten wurde,
- $L_{p,pk}$: maximaler Spitzenpegel (zero-to-peak im Betrag) der Einzelschlaganalyse.

> *Technische Anmerkung:* Die niederländische Zulassungsbehörde Rijkswaterstaat hat den Beurteilungspegel SEL_1 eingeführt, der den maximalen Einzelereignispegel (SEL_{max}) charakterisiert und nicht mit dem SEl_{01}, d. h. dem 1 %-Überschreitungspegel, gleichzusetzen ist.

Durch die Angabe von Überschreitungspegeln für den Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E) kann eine statisch stabile Charakterisierung einer gesamten Pfahlinstallation vorgenommen werden, da zumindest für Monopfähle zu Beginn der Rammung deutlich geringere Rammenergien angewendet werden

als zur Erreichung der Endtiefe, so dass sich der Einzelereignispegel während der Rammung erheblich in seiner Amplitude verändern kann; Kapitel 5.2.2.

Zudem wird mit dem Vergleich des Überschreitungspegels des Einzelereignispegels SEL_{05} der allgemeinen Messunsicherheit bei allen Unterwasserschallmessungen Rechnung getragen, da 4,99 % aller erfassten Rammschläge bzw. Einzelereignispegel pro Pfahlinstallation den Lärmschutzwert von 160 dB_{SEL} überschreiten können.

Für die Speicherung sämtlicher prozessierter Rammschalldatensätze wurde 2016 ein verbindlicher Standard seitens des BSH im Rahmen des F&E-Vorhabens NavES[1] entwickelt (Kapitel 4.4). Das BSH entwickelte zudem ein technisches Fachinformationssystem für Unterwasserschall (MarinEARS)[2], das seit 2016 in Betrieb ist. Das Fachinformationssystem dient zum einen der Aufnahme, Überprüfung, Validierung und Qualitätssicherung sämtlicher Informationen von Unterwasserschallmessungen inkl. aller relevanten Metadaten, wie z. B. Bathymetrie-Daten, Pfahl-Design und Spezifikationen der angewendeten Schallminderungsmaßnahmen, und zum anderen der projektübergreifenden Analyse sämtlicher Datensätze. Damit stellt das Fachinformationssystem MarinEARS[2] eine zentrale Wissensgrundlage dar. Somit kann gewährleistet werden, dass sämtliche prozessierten Ergebnisdaten sowie Messrohdaten und projektspezifischen Zusatzinformationen (Metadaten) in standardisierter Form unabhängig vom OWP-Betreiber hinsichtlich der Unterwasserschallmessungen mittels einer Web-Applikation zur Verfügung gestellt werden können.

Auf der Basis dieses Fachinformationssystems können zur Beurteilung naturschutzrechtlicher Fragestellungen Werkzeuge für die Behörden im Rahmen des Genehmigungsverfahrens und der (Bau-) Überwachung für zukünftige OWP-Bauvorhaben entwickelt werden. Darüber hinaus wird das BSH projektübergreifende Erkenntnisse der Öffentlichkeit zur Verfügung stellen, so dass z. B. Windparkentwickler und beteiligte Baufirmen Zugriff auf die aktuellen Erkenntnisse hinsichtlich Schallschutz bekommen.

Im Rahmen des F&E-Vorhabens NavES[1] wurden von der *itap GmbH* sämtliche verfügbaren Unterwasserschallmessdaten aller OWP-Bauvorhaben aus der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee zwischen 2012 und 2016 in standardisierter Form nochmals ausgewertet und in das technische Informationssystem MarinEARS[2] integriert.

Seit der Operationalisierung des MarinEARS[2]-Fachinformationssystems im Jahre 2016 sind OWP-Bauvorhaben im Rahmen des Bauvollzuges angehalten, sämtliche Unterwasserschalldaten und damit verbundene Begleitinformationen direkt in das MarinEARS[2] einzupflegen. Die Aufnahme von prozessierten Unterwasserschalldaten und Metadaten erfolgt dabei über eine Web-Applikation. Tabelle 1 fasst die für die nachfolgenden, projektübergreifenden Analysen zur Verfügung stehenden Datensätze aus dem Fachinformationssystem MarinEARS[2] zusammen.

Tabelle 1: *Überblick über den derzeitigen Stand des MarinEARS²-Fachinformationssystems. Sämtliche vorhandenen Datensätze standen für die nachfolgenden Analysen zur Verfügung.*

Parameter	Wertebereich	Kommentar
Offshore-Windparks	21*[1]	3 Stk. in der Ostsee, 18 Stk. in der Nordsee (Bauzeiten seit 2012)
Einzelbauwerke	28*[2]	inkl. Umspannstationen, Konverterplattform, Messmasten und Forschungsplattformen
Gewässer/ Bodenverhältnisse	AWZ der dt. Nord- und Ostsee	Nordsee: Sande mit unterschiedlichen Dichten und Mächtigkeiten Ostsee: Sand-, Geschiebemergel- und Kreideschichten
Strömung	≤ 0,75 m/s	
Wassertiefen	22 bis 41 m LAT	sowohl in der Nord-, als auch in der Ostsee
Anzahl der Fundamente	1.458	~ 80 % der Fundamente und Gründungspfähle standen für die nachfolgende Auswertung zur Verfügung*[3]
Anzahl der Pfähle	2.464	
Pfahldurchmesser	1,829 bis 8,0 m	
Art der Installationsschiffe	Schwimmende Schiffe (engl. floating vessel) oder Hubplattformen (engl. jack-up platform)	Bei schwimmenden Installationsschiffen wurden Schiffe mit einem dynamischen Positionierungssystem (DP-vessel) und Schiffe, die sich mittels Anker auf Position halten, eingesetzt.

*[1] Aufgrund des Testcharakters wurden die OWPs *Alpha Ventus* (Bauphase 2009), *Trianel Borkum West II* Bauphase 1 (2011/2) und *BARD Offshore I* (2010 bis 2012) in der deutschen AWZ noch nicht in das MarinEARS²-Fachinformationssystem implementiert. Aufgrund der unterschiedlichen Zuständigkeiten innerhalb der 12-Seemeilen-Zone sind die drei OWPs *Riffgrund* (2012, Nordsee), *Nordergründe* (2016, Nordsee) und *EnBW Baltic I* (2012, Ostsee) bisher ebenfalls nicht in das MarinEARS²-Fachinformationssystem eingebunden.

*[2] Nur Fundamentstrukturen, die im Impulsrammverfahren in den Meeresboden eingebracht wurden; sonstige Installationsmethoden siehe alternative Gründungsverfahren und -strukturen in Kapitel 7.4.3.

*[3] Bisher konnten aus zeitlichen Gründen noch nicht sämtliche OWPs der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee aus den Baujahren 2010 bis 2014 qualitätsgesichert in das Fachinformationssystem eingebunden werden. Zudem gab es gerade in den Anfangsjahren 2012 und 2013 teilweise Ausfälle von Messgeräten, so dass für eine geringe Anzahl von Fundamenten/Gründungspfählen keine Unterwasserschallmessdaten vorliegen.

4.4 Qualitätskontrolle von prozessierten Unterwasserschalldaten

Bis zur Veröffentlichung der ISO 18405 im Jahr 2017 gab es keine internationale Terminologie für Unterwasserschall, sondern lediglich nationale Messvorschriften (z. B. BSH, 2011 in Deutschland und de Jong et al., 2011 in den Niederlanden), die zum Teil leicht unterschiedliche Begrifflichkeiten und Definitionen verwendeten. Mit der ISO 18406 wurde zudem 2017 ein Mindeststandard an die Ergebnisdarstellung von Ergebnissen aus dem Impulsrammverfahren standardisiert.

Basierend auf der internationalen Standardisierung entschied das BSH, den internen Standard für die Übertragung von prozessierten Unterwasserschall-Datensätzen in das Fachinformationssystem MarinEARS[2] im Jahr 2017 zu ergänzen und sämtliche bis 2016 im BSH vorliegenden Unterwasserschall-Messrohdaten standardisiert nochmalig für alle OWP-Bauvorhaben der deutschen AWZ auszuwerten und anschließend einer Qualitätskontrolle zu unterziehen.

Dabei stellte sich heraus, dass zum Teil Abweichungen zwischen einzelnen Kurzberichten, die projektspezifisch innerhalb von 24 h nach Ende einer Rammung gefertigt wurden, dem technischen Abschlussbericht und den qualitätsgesicherten, prozessierten Datensätzen im MarinEARS[2] von bis zu ±1 dB vorliegen.

Unterschiede zwischen den Kurzberichten und den technischen Abschlussberichten pro OWP-Bauvorhaben basieren zumeist auf der Tatsache, dass im Falle von Störgeräuschen und/oder geringen Signal-Rausch-Abständen zwischen Hintergrundschall und Rammschall innerhalb von 24 h keine qualitätsgesicherte und detaillierte Auswertung erfolgen konnte.

Unterschiede zwischen den prozessierten Datensätzen im MarinEARS[2] und den jeweiligen Abschlussberichten, erstellt vor 2017, variieren im Schnitt um bis zu ±1 dB. Die Ursache der Abweichung ist

(i) der Festlegung einer Einzelschlagauswertung (und damit werden keine 30 s Mittelwerte gebildet),
(ii) den besseren und schnelleren Einzelschlagdetektoren inkl. dazugehöriger Filterfunktionen und
(iii) einem geringeren zulässigen Signal-Rausch-Abstand von 6 statt vorher 10 dB sowie
(iv) der Einführung einer kaufmännischen Rundung auf ganze Dezibel-Werte

geschuldet[7].

[7] Bei einer Auswertung aus z. B. dem Jahre 2014 mit 158,4 dB (gerundet 158 dB) ergab eine nachträgliche und qualitätsgesicherte Analyse aus dem Jahr 2018 einen Wert von 158,6 dB (gerundet 159 dB).

Technischer Hinweis: Am Beispiel OWP *Butendiek* mit mehreren hundert Messungen in einer Entfernung von 750 m zur Pfahlgründung, bestehend aus 80 Monopfahlgründungen mit zum Teil bis zu vier Messpositionen in unterschiedlichen Raumrichtungen und unterschiedlichen Hydrophonhöhen über Grund, kam es zu sechs Abweichungen von 1 dB zwischen Abschlussbericht und prozessierten Ergebnisdatensätzen im MarinEARS[2].

5. Entstehung und Weiterleitung von impulshaltigem Unterwasserschall bei Rammarbeiten

Beim Bau von OWP-Fundamenten können unterschiedliche Schallminderungsmaßnahmen zum Schutz der Umwelt zur Anwendung kommen. Dabei kann man grundsätzlich die nachfolgenden Unterteilungen vornehmen:

- Anwendung von primären und / oder sekundären, technischen Schallschutzsystemen zur Minderung von impulshaltigen Schalleinträgen ins Wasser (Kapitel 0, 7.4.1 und 7.4.2) und
- Anwendung von alternativen Gründungsstrukturen bzw. -verfahren zur Vermeidung von impulshaltigen Schalleinträgen ins Wasser (Kapitel 7.4.3).

Für den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen bei der Installation von Gründungsstrukturen im Offshore-Bereich ist es erforderlich, die Einflussfaktoren für die Entstehung von Rammschall, den Eintrag ins Wasser und die Weiterleitung im flachen Wasser zu kennen, um ggf. gezielt die resultierenden Schallemissionen der OWP-Gründungsarbeiten zu verringern.

Bei der projektübergreifenden Auswertung der bestehenden MarinEARS[2]-Datenbank stellten sich folgende Einflussparameter heraus:

- Standortspezifische Eigenschaften wie Wassertiefe, Bodenbeschaffenheit, Topographie, bzw. Bathymetrie, Strömung und die daraus resultierende Schallausbreitung,
- technisch-konstruktive Eigenschaften wie Fundament- und Pfahl-Design, Rammhammertyp und Rammenergie, Rammverfahren und Einbindetiefe sowie die Offshore-Logistik, bestehend aus z. B. den am Bau beteiligten Schiffen.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden diese anhand von empirischen Daten zusammengefasst und diskutiert.

5.1 Standortspezifische Einflussfaktoren

5.1.1 Einfluss des Bodenwiderstandes

Unterschiedliche Bodenwiderstände, vor allem in der deutschen AWZ der Nordsee mit unterschiedlich dicht gelagerten Sandschichten und teilweise Einschließungen von Toneinlagerungen, spiegelten sich in der Verwendung von unterschiedlichen Rammenergien bei den Gründungsarbeiten wider. Bei der Fundamentinstallation ist es notwendig, den vorherrschenden Bodenwiderstand, abhängig von der

jeweiligen Einbindetiefe im Meeresboden, zu überwinden. Generell gilt für die deutsche AWZ der Nordsee: je größer der Bodenwiderstand, desto höher ist i. d. R. die notwendige Rammenergie, um den Bodenwiderstand zu überwinden. Zudem korrelieren die gemessenen Schallpegelwerte in einer Entfernung von 750 m zur Rammquelle mit den eingesetzten Rammenergien; siehe Abbildung 15 in Kapitel 5.2.2.

Es zeigte sich auch in den drei OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Ostsee eine deutliche Korrelation zwischen der eingesetzten Rammenergie und den Schallpegelwerten in 750 m. Je größer die eingesetzte Rammenergie war, desto höher fielen die gemessenen Schallpegelwerte aus; siehe Kapitel 5.2.2. Zudem zeigte sich bei der statistischen Analyse sämtlicher deutscher Bauvorhaben in der AWZ der Nord- und Ostsee, dass die Schallpegel in der Ostsee bei vergleichbarem Pfahl-Design und verwendeter Rammenergie um bis zu 2 dB höher ausfielen als in der Nordsee. Es wird vermutet, dass dies mit den unterschiedlichen, komplexen Bodenschichtungen (Sand, Geschiebemergel und Kreideschichten) zusammenhängen könnte.

Für die deutsche AWZ der Ostsee, wo die oberste Schicht zumeist aus Sand bzw. Schlamm besteht, gefolgt von Geschiebemergel und sich anschließenden Kreideschichten, treten zum Teil deutlich unterschiedlichere und höhere Bodenwiderstände als in der sandigen Nordsee auf. In einem deutschen Bauvorhaben aus der Ostsee mit sehr komplexen Bodenschichtungen von unterschiedlicher Mächtigkeit wurde eine interne, statistische Analyse der vorherrschenden Bodenwiderstände, der eingesetzten Rammenergie und der in 750 m Entfernung aufgenommenen Unterwasserschallmessdaten mithilfe von Geologen und Akustikern durchgeführt. Abgesehen von der Korrelation zwischen verwendeter Rammenergie und gemessenen Schallpegelwerten, konnte allerdings weder eine signifikante Korrelation zwischen akustischen Messdaten und unterschiedlichen Bodenschichtungen, noch zwischen akustischen Messdaten und Bodenwiderständen identifiziert werden.

Technische Anmerkung: Es zeigte sich in den OWP-Bauvorhaben in der deutschen Ostsee, dass die verwendete Rammenergie in den harten Bodenschichtungen, wie z. B. Kreide, nicht nur von dem jeweils vorherrschenden Bodenwiderstand, sondern auch von dem angewendeten Rammverfahren, insbesondere der Schlagwiederholungsfrequenz, abhing. Der Zusammenhang zwischen Bodenwiderstand, einzusetzender Rammenergie zur Überwindung des Bodenwiderstands und Schallabstrahlung ist somit sehr komplex und diese drei Parameter sind grundsätzlich nicht linear unabhängig voneinander.

5.1.2 Bodenkopplungen

Die Bodenkopplung beschreibt, dass die vom Rammhammer in den zu gründenden Pfahl eingebrachte Rammenergie bzw. Kraft zum Teil in den Boden weitergeleitet wird und dann in den unteren Bodenschichten wieder Richtung Wassersäule reflektiert und ins Wasser emittiert wird.

Im F&E-Vorhaben BORA[4] (Chmelnizkij et al., 2016) wurden innerhalb von drei deutschen OWP-Bauvorhaben in der Nordsee umfangreiche Unterwasserschall- und Bodenschwingungsmessungen in unterschiedlichen Raumrichtungen und Abständen zum jeweiligen Fundament durchgeführt. Dabei wurden jeweils Impulsrammungen pro OWP-Bauvorhaben mit und ohne technischem Schallschutzsystem durchgeführt. Zudem kam in Pfahlnähe (max. Abstand 80 m) ein sogenanntes „Hydrophone Line-Array" mit insgesamt 16 Hydrophonen in unterschiedlichen Höhen über dem Meeresgrund zum Einsatz (erstes Hydrophon 2 m über Grund, nachfolgende jeweils im Abstand von ca. 1,5 m Höhe). Mittels eines Stahlseils und einer Fixierung an Bord des Installationsschiffes konnte eine präzise, vertikale Ausrichtung sämtlicher Hydrophone gewährleistet werden. Mit dieser Anordnung von mehreren Hydrophonen in der Wassersäule sollte der Einfluss der Hydrophonhöhe auf den gemessenen Schalleintrag ins Wasser in unmittelbarer Pfahlnähe untersucht werden; siehe Kapitel 5.1.6.

Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Schalldruckverlauf eines einzelnen Rammschlags in Pfahlnähe mit und ohne den Einsatz eines pfahlnahen Schallschutzsystems in unterschiedlichen Höhen über dem Meeresgrund.

Es zeigen sich anhand von Abbildung 2 zwei physikalische Phänomene:

(i) (links): Die Impulsrammung verursacht eine Strukturschwingung im Monopfahl, die als eine Wanderwelle mit einer bestimmten Geschwindigkeit vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß läuft. Dies verursacht eine zeitlich verzögerte Schallabstrahlung ins Wasser (Schallemission) nach dem Huygensschen Prinzip.

(ii) (rechts): Bei der Impulsrammung mit einem pfahlnahen Schallschutzsystem wird ein sehr großer Anteil der direkten Schallabstrahlung ins umgebende Wasser gemindert. Die Messungen im akustischen Nahfeld zeigen demnach ein deutlich gemindertes Rammschallsignal. Dieses Rammschallsignal hebt sich jedoch immer noch deutlich vom permanenten Hintergrundschall ab. Es zeigt sich zusätzlich ein in der Amplitude deutlich gemindertes, impulshaltiges Signal, welches sich vom Boden aus zeitlich versetzt nach oben im Wasser ausbreitet. Dieses Impulssignal wird vermutlich durch die Bodenkopplung verursacht. Dieser Energieeintrag wird dann zeitlich und örtlich versetzt in das Wasser als Unterwasserschall eingetragen.

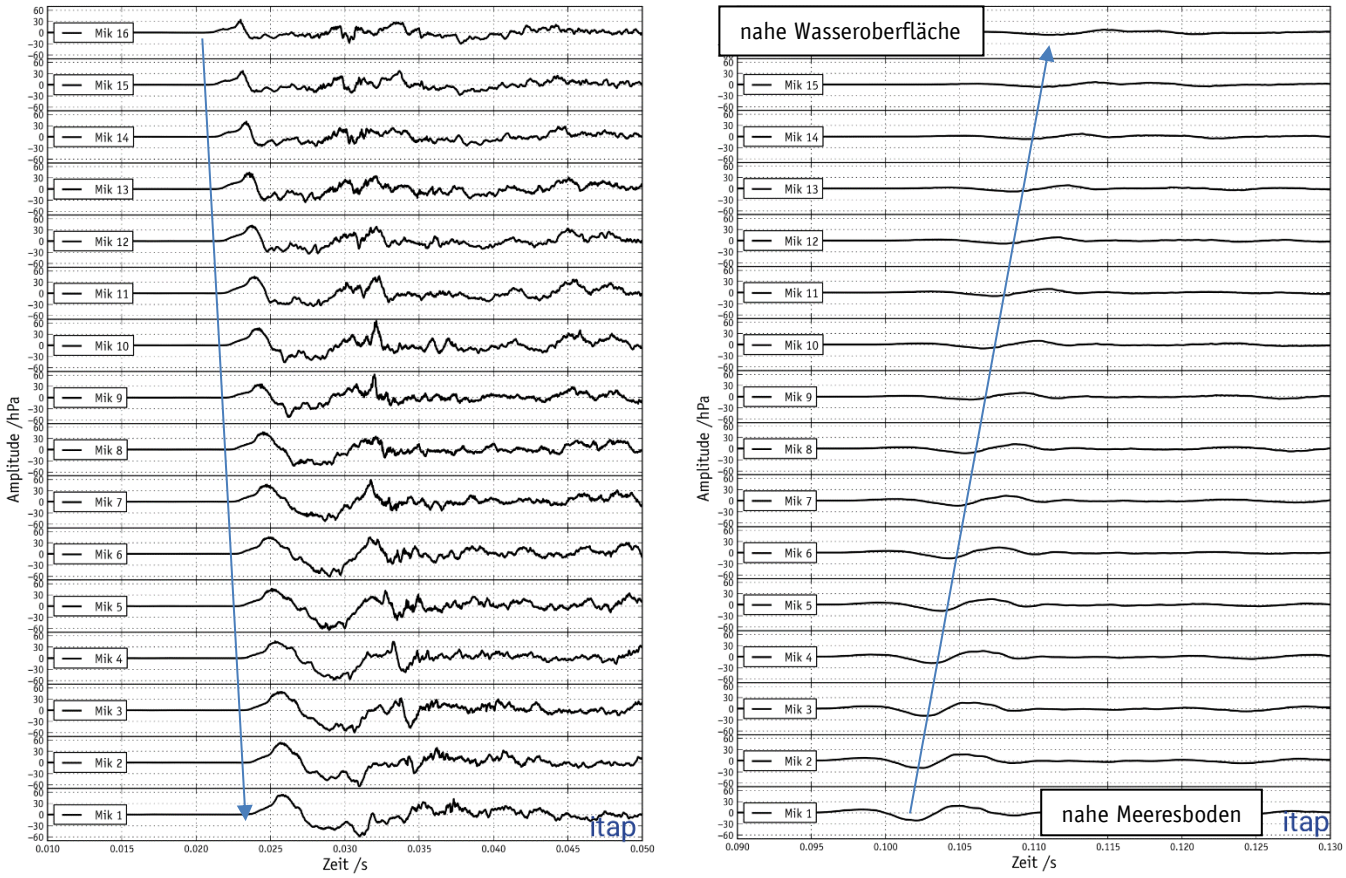


Abbildung 2: *Zeitlicher Verlauf eines einzelnen Rammschlags an einem Monopfahl, gemessen in ca. 80 m Entfernung mit mehreren Hydrophonen in unterschiedlicher Höhe zum Meeresboden ohne (links) und mit (rechts) dem Einsatz eines pfahlnahen Schallschutzsystems. Mik1 kennzeichnet das 1. Hydrophon 2 m über dem Meeresboden, alle weiteren Hydrophone befanden sich jeweils in einem vertikalen Abstand von ca. 1,5 m zueinander. Die Wassertiefe in dem Bauvorhaben betrug ca. 30 m.*

Von der *Technischen Universität Hamburg Harburg* (TUHH), der *Leibniz Universität Hannover* (LUH) und der *Christian-Albrechts-Universität zu Kiel* (CAU) wurden im Rahmen des F&E-Vorhabens BORA[4] die Bodenkopplungen in der deutschen AWZ der Nordsee mit sandigem Boden wissenschaftlich untersucht (z. B. Chemlnizkij et al., 2016). Es stellte sich heraus, dass die Bodenkopplungen von den jeweiligen vorhandenen Bodenschichtungen und Bodenwiderständen in sandigen Untergründen der deutschen AWZ der Nordsee signifikant abhängig sind.

Theoretische Berechnungen der Bodenkopplungen weisen darauf hin, dass der Schalleintrag ins Wasser in sandigen Böden bei einem idealen, pfahlnahen Schallschutzsystem (Annahme: 100 % des Direktschalleintrages vom Pfahl werden gemindert) ca. 1/10 des Direktschalleintrages vom Pfahl beträgt (Stokes et al., 2010). Dies bedeutet, dass der Schalleintrag ins Wasser durch Bodenkopplungen in etwa 20 dB geringer ist als der direkt vom Pfahl ins Wasser eingetragene Schall.

Bei anderen Bodenschichtungen und Bodenwiderständen, wie z. B. in der deutschen AWZ der Ostsee, ist derzeit noch nicht eindeutig wissenschaftlich untersucht worden, wie groß die Bodenkopplungen ausfallen können und von welchen Parametern diese abhängen.

I. d. R. ist davon auszugehen, dass die Bodenkopplungen aufgrund der deutlich geringeren Amplituden bei ungemindertem Rammschall keinen wesentlichen Beitrag zum Gesamtpegel im Fernfeld leisten. Allerdings kann die Bodenkopplung die Wirksamkeit insbesondere pfahlnaher Schallschutzsysteme erheblich beeinflussen; siehe Kapitel 6.3.

5.1.3 Einfluss der Wassertiefe

Die Wassertiefe kann in zweierlei Hinsicht Einfluss auf Rammschall im Flachwasserbereich haben:

(i) der Schalleintrag kann aufgrund der Wassertiefe gemindert werden,
(ii) die Wassertiefe beeinflusst die Schallausbreitung ins Wasser (siehe Kapitel 5.1.5).

Der Schalleintrag ins Wasser wird theoretisch von der Wassertiefe, vor allem im Flachwasser, beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist kein kontinuierlicher Schalleintrag und damit verbundene Schallausbreitung möglich. Je flacher das Gewässer, umso höher ist diese Frequenz.

In Wassertiefen von ca. 25 m liegt diese Grenzfrequenz f_g je nach Sedimenttyp bei unter 50 Hz (Urick, 1983). In Abbildung 3 ist die untere Grenzfrequenz für vorwiegend sandige Böden als Funktion der Wassertiefe dargestellt. Zudem sind die Bandbreiten der unteren Grenzfrequenz bei unterschiedlichen Bodenschichtungen, wie z. B. Ton und Geschiebemergel, schattiert dargestellt (Jensen et al., 2010). Schall in der Nähe und unterhalb der Grenzfrequenz kann wesentlich schlechter ins Wasser eingekoppelt werden und wird zudem mit wachsender Entfernung zur Schallquelle stärker gedämpft (Einfluss auf die Schallausbreitung; siehe Kapitel 5.1.5).

Die bisher in der deutschen AWZ gebauten OWPs, die auch im MarinEARS[2] eingepflegt sind, befinden sich in Wassertiefen zwischen ca. 20 und 40 m (LAT). Die Grenzfrequenz f_g für sandige Böden, wie in der deutschen AWZ der Nordsee, ist somit deutlich geringer als die zu erwartenden Maxima im ungedämpften Rammspektrum, die üblicherweise zwischen 63 und 250 Hz liegen; siehe Abbildung 14 in Kapitel 5.2.1. Die Messdaten bestätigen bisher, dass die Wassertiefe zwischen 20 und 40 m keinen wesentlichen Einfluss auf den Schalleintrag ins Wasser hinsichtlich des Gesamtpegels für impulshaltige Rammungen hat.

Der *itap GmbH* liegen jedoch vereinzelt Rammschallmessdaten aus sehr flachen Gewässern vor (innerhalb der 12-SMZ der deutschen Nordsee), die eindeutig den Einfluss der Grenzfrequenz zeigen; siehe Abbildung 4.

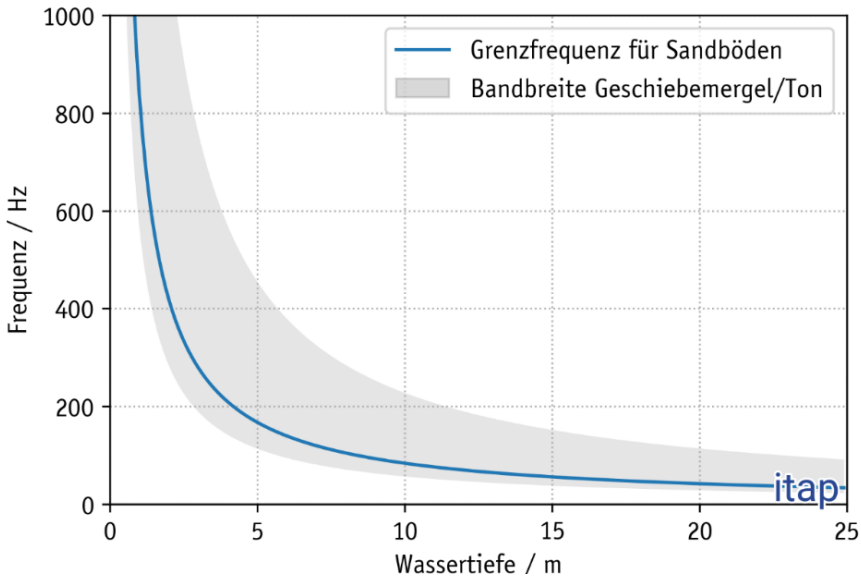


Abbildung 3: *Theoretische untere Grenzfrequenz f_g für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für unterschiedliche Bodenschichtungen: blaue Linie resultiert unter Annahme von sandigen Böden und die grau schattierte Fläche skizziert den Einfluss von unterschiedlichen Böden, wie Ton und Geschiebemergel (Urick, 1983; Jensen et al., 2010).*

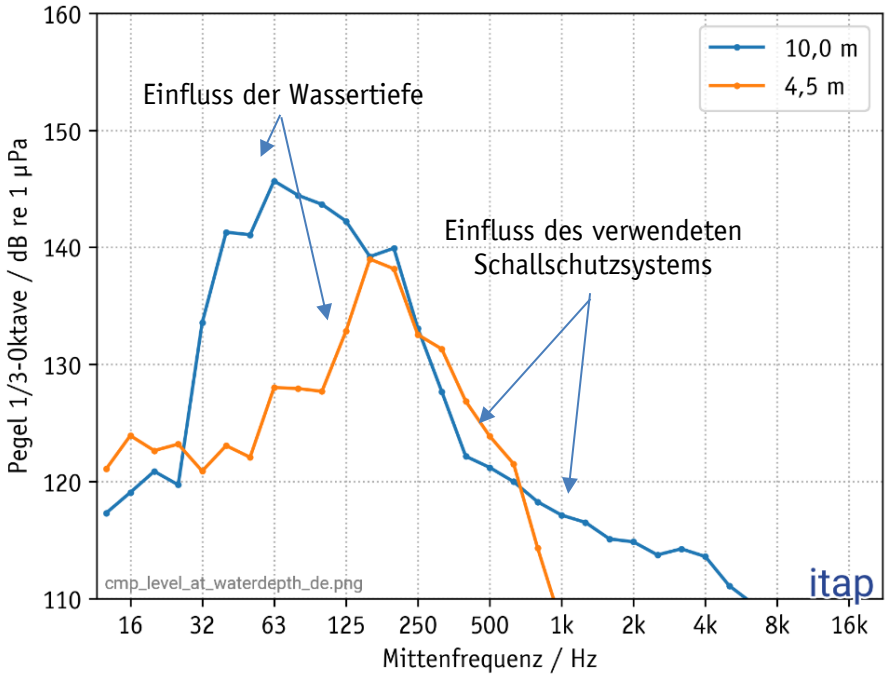


Abbildung 4: *Gemessenes 1/3-Oktav-Spektrum einer Monopfahl-Installation in zwei unterschiedlichen Wassertiefen (4,5 und 10 m Wassertiefe; sandiger Untergrund). Beide Installationen wurden mit vergleichbaren Schallschutzsystemen durchgeführt. (Quelle: Nicht veröffentlichte Messdaten der itap GmbH aus einem Bauvorhaben außerhalb der dt. AWZ.)*

Im gezeigten Beispiel (Abbildung 4) wurde ein sekundäres, technisches Schallschutzsystem während der Rammung verwendet, so dass sich nur noch sehr geringe Schalleinträge im hochfrequenten Frequenzbereich (> 500 Hz) im Wasser befinden. Bei tiefen Frequenzen zeigt sich jedoch der Einfluss der unterschiedlichen Wassertiefen. In einer Wassertiefe von ca. 4,5 m ist eine Schallabstrahlung eines Pfahles im tieffrequenten Bereich begrenzt. Laut Jensen et al. (2010) ist erst ab einer Frequenz von ca. 160 Hz ein Schalleintrag ins Wasser bei 4,5 m Wassertiefe und sandigem Boden zu erwarten.

5.1.4 Bathymetrie, Strömung und Schallgeschwindigkeit

Nach der nationalen Messvorschrift (BSH, 2011) werden i. d. R. nur in einer Richtung in Messabständen von 750 m, 1.500 m und im nächstgelegenen FFH-Schutzgebiet Unterwasserschallmessungen angeordnet und durchgeführt. Aus diesem Grund ist eine statistische Analyse der Parameter Bathymetrie, Strömung und Schallgeschwindigkeit anhand der im Fachinformationssystem MarinEARS[2] vorhandenen Datensätze wissenschaftlich nicht vollständig durchführbar. Es werden jedoch an vereinzelten Fundamentstandorten Unterwasserschallmessungen zur Erfassung der Richtungsabhängigkeit der eingesetzten Schallschutzsysteme in Anlehnung an die Messvorschrift (BSH, 2013a) und die DIN SPEC 45653 (2017) meistens in 750 m Entfernung angeordnet, die für die Untersuchung der o. g. Parameter teilweise verwendet werden können.

Im F&E-Vorhaben BORA[4] wurden in drei deutschen OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Nordsee Unterwasserschallmessungen in unterschiedlichen Raumrichtungen und Entfernungen von ca. 80 m bis 20 km zum Pfahl durchgeführt. Zusätzlich zu den Unterwasserschallmessungen wurden zudem die Strömung, die Wassertemperatur und die Schallgeschwindigkeit messtechnisch erfasst. Tendenziell ergaben sich bei Rammungen ohne Schallschutzsysteme Unterschiede von wenigen Dezibel zwischen Messungen im selben Abstand, aber in unterschiedlichen Raumrichtungen. Starke Unterschiede in der Bathymetrie dieser drei OWPs zeigten sich allerdings ebenfalls nicht. Messtechnisch ist jedoch mit einer unsystematischen Messunsicherheit, ebenfalls im Bereich von wenigen Dezibel, zu rechnen (ISO 18406; BSH, 2011), so dass bisher bei annähernd ebener Bathymetrie und sandigen Böden mit unterschiedlichen Dichten und Mächtigkeit kein signifikanter Einfluss auf die Schallausbreitung messtechnisch erfasst werden konnte. Die Messungen bei Impulsrammungen ohne technische Schallschutzsysteme in Anlehnung an die DIN SPEC 45653 bestätigen diese Aussage zumindest in einer Messentfernung von 750 m.

Aufgrund der Tatsache, dass die Nordsee von zwei Seiten mit dem Atlantik verbunden ist, es Gezeiten gibt und die Wassertiefen in der deutschen AWZ der Nordsee zwischen 20 m und ca. 50 m betragen, findet hier überwiegend eine sehr gute Durchmischung des Wassers statt. Vereinzelt konnten in langanhaltenden „Schönwetter-Phasen“ geringfügige Temperaturschichtungen messtechnisch erfasst werden. Die Temperatur hat einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit, so dass Schallgeschwindigkeitsprofile innerhalb der Wassersäule messtechnisch bestimmt werden konnten. In

der flachen Nordsee zeigten diese Schallgeschwindigkeitsprofile jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Schallausbreitung von impulshaltigem und tieffrequentem Rammschall (nicht veröffentlichte Messdaten der *itap GmbH*). Zudem zeigten sich bei den Messungen im F&E-Vorhaben BORA[4] keine wesentlichen Einflüsse der Strömung (i. d. R. in der deutschen Nordsee maximal 0,75 m/s) auf die Schallgeschwindigkeit (i. d. R. ~ 1.500 m/s) (Bellmann et al., 2013 & 2015; Gündert et al., 2015).

In der deutschen AWZ der Ostsee wurden einmalige Unterwasserschallmessungen in zwei unterschiedlichen Höhen (2 und 10 m über dem Meeresboden bei einer Wassertiefe größer 20 m) in Anlehnung an die BSH-Messvorschrift (2011) und die ISO 18406 (2017) durchgeführt. Es stellten sich während der gesamten Rammung Pegelunterschiede von bis zu 5 dB zwischen der unteren und der oberen Hydrophonhöhe ein. Im Nachgang konnte eine Felsformation von mehreren Metern Höhe im Baufeld ausfindig gemacht werden, die das Hydrophon an der unteren Position vollständig vom Rammort abschirmte.

Grundsätzlich ist aufgrund der Wassertiefe (Kapitel 5.1.3) und der frequenzabhängigen Schallausbreitung im Flachwasser (Kapitel 5.1.5) jedoch ein Einfluss der Bathymetrie nicht auszuschließen.

5.1.5 Schallausbreitung

Für überschlägige Rechnungen kann angenommen werden, dass der Schalldruck mit der Entfernung nach einem einfachen Potenzgesetz abnimmt (geometrische Ausbreitungsdämpfung). Der Schallpegel verringert sich dann um:

$$\mathrm{TL} = k \cdot log_{10}\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \text{ [dB]} \qquad \textit{Gl. 8}$$

mit

r_1 und r_2 – Entfernung zur Schallquelle vergrößert sich von r_1 auf r_2,

TL – Ausbreitungsdämpfung; engl. Transmission Loss,

k – Konstante (für die dt. AWZ der Nord- und Ostsee kann überschlägig k = 15 angesetzt werden).

Häufig wird die Ausbreitungsdämpfung für den Abstand r_1 = 1 m (fiktiver Abstand zur punktförmig gedachten Quelle) angegeben. Daraus wird die Schallleistung eines zu rammenden Pfahls in einem Abstand von 1 m berechnet und oftmals bei Prognoseverfahren zur Anwendung gebracht. Gleichung 8 vereinfacht sich dann zu:

$$\mathrm{TL} = -k \cdot log_{10}(r/Meter) \text{ [dB]} \qquad \textit{Gl. 9}$$

In der „Richtlinie für Unterwasserlärm – Installation von Rammpfählen“ (Danish Energy Agency, 2016) ist die folgende Ausbreitungsdämpfung für Lärmereignisse in der Ost- und Nordsee mit Wassertiefen bis zu 50 m angegeben:

$$\mathrm{TL} = -14.72 \cdot log_{10} r + 0.00027 \cdot r \text{ [dB]} \qquad \textit{Gl. 10}$$

Bei beiden oben genannten Berechnungen wird jedoch nicht berücksichtigt, dass eine Abnahme des Schalldrucks von der Frequenz abhängt. Zusätzlich gelten diese Formeln streng genommen nur für das akustische Fernfeld, d. h. ab einer Entfernung von einigen Wellenlängen zur Quelle. Darüber hinaus wirkt sich das Wetter auf den Schallpegel im Wasser in großen Entfernungen aus. Der Schalldruckpegel nimmt über die Entfernung bei starkem Wind und starker See deutlich schneller ab. Dies ist die Folge einer höheren Oberflächenrauigkeit des Meeres und stärkeren Lufteinschlüssen in der oberen Meeresschicht durch die Wellenschläge.

Thiele und Schellstede (1980) spezifizierten Näherungsgleichungen zur Berechnung der Schallausbreitung in verschiedenen Regionen der Nordsee sowie für „raue" und „glatte" See. Die folgende Gleichung für flaches Gewässer und „glatte" See (Abkürzung „IIg" in Abbildung 5) kann daher mit den Messergebnissen verglichen werden:

$$TL = (23 + 0.7\,F)\log_{10} r + (0.3 + 0.05\,F + 0.005\,F^2)\,r\,10^{-3} \ \text{[dB]} \qquad \text{Gl. 11}$$

mit

F = $10\ log(f/\text{[kHz]})$.

Strenggenommen gelten die Zusammenhänge aus Gleichung 11 nur für die deutsche AWZ der Nordsee bei guter Durchmischung des Wassers, „glatter" See und ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil.

> *Technische Anmerkung:* Bis jetzt finden Rammarbeiten aus sicherheitstechnischen Gründen zumeist nur bei „glatter" See und wenig Wind statt, so dass der Ansatz von Thiele & Schellstede (1980) für „raue" See nicht berücksichtigt werden sollte. Allerdings werden sich die Restriktionen aufgrund der immer größer werdenden Installationsschiffe in Zusammenhang mit der Wellenhöhe voraussichtlich verändern, so dass in Zukunft auch bei „rauer" See Pfähle mittels Impulsrammverfahren im Meeresboden verankert werden könnten. Durch Wind und Welle wird bei „rauer" See mehr Luft in die obere Wasserschicht eingebracht; dies führt zu einer reduzierten Schallausbreitung über große Distanzen (> 8 km).

In Abbildung 5 sind die drei o. g. Ausbreitungsansätze zum Vergleich mit realen Unterwasserschallmessungen während der Gründungsarbeiten an einem Monopfahl während des F&E-Vorhabens BORA[4] im Impulsrammverfahren in Entfernungen von 80 m bis 80 km dargestellt. Die Messpositionen zwischen 20 und 80 km Entfernung resultieren aus parallelen Unterwasserschallmessungen in mehreren deutschen OWPs.

Beide semi-empirischen Ansätze, wie z. B. Danish Energy Agency (2016) und Thiele & Schellstede (1980), weisen eine hohe Ähnlichkeit untereinander auf und zeigen überdies eine hohe Übereinstimmung mit tatsächlichen Unterwasserschallmessungen während Impulsrammungen in der Nordsee. Nur für Abstände von weniger als 100 m und bei Entfernungen größer 10 km unterscheiden sich beide

Gleichungen z. T. erheblich voneinander. Diese Unterschiede würden sich auch signifikant auf eine Berechnung des Quellpegels auswirken.

Abbildung 6 zeigt an einem Beispiel das mittlere, ungeminderte Rammschallspektrum (50 %-Perzentil = Medium), gemessen in unterschiedlichen Entfernungen zum Fundament. Es zeigt sich, dass die höheren Frequenzen bei der Schallausbreitung über größere Entfernungen stärker in der Amplitude gemindert werden als tiefe Frequenzen.

> *Technische Anmerkung:* Die Ausbreitungsdämpfung (TL) hat einen wesentlichen Einfluss auf die Schallausbreitung über größere Entfernungen und kann sich beispielsweise bei stark variierender Bathymetrie, bei anderen Bodengegebenheiten (Kapitel 5.1.1 und 5.1.2) als in der Nordsee, z. B. Ostsee mit Geschiebemergel und Kreideschichten, oder bei Berechnungen von spektral gewichteten Beurteilungspegeln (z. B. National Marine Fisheries Service, 2018; Southall et al., 2019) für unterschiedliche Spezies deutlich von der o. g. Ausbreitungsdämpfung unterscheiden. Bei der Anwendung von spektralen Gewichtungen empfiehlt sich bei Ausbreitungsrechnungen über mehr als 10 km zumeist eine direkte, messtechnische Erfassung der vorhandenen Ausbreitungsdämpfung.

Die frequenzabhängige Schallausbreitung (Ausbreitungsdämpfung) hängt auch mit den mehrfachen Reflexionen an der Wasseroberfläche und am Meeresboden zusammen. Dieser Effekt wird auch Dispersion genannt und bewirkt nicht nur eine frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung und eine damit verbundene, frequenzabhängige Reduktion der Amplitude, sondern auch, dass sich ein impulshaltiges Signal zeitlich ausweitet; siehe Abbildung 7. Der Schall eines Rammschlags wird also mit zunehmender Entfernung zeitlich gestreckt. Zudem nimmt die Amplitude mit der Entfernung zur Quelle stetig ab, so dass sich der Signal-Rausch-Abstand stetig verringert. Dies führt zum einen zu einer Vermischung eines einzelnen Rammschlages mit dem permanenten Hintergrundschall und zum anderen kann es zu einer Überlagerung von aufeinanderfolgenden Rammschlägen bei hohen Schlagwiederholungsfrequenzen kommen, so dass der Rammschall im Wasser in großen Entfernungen zur Quelle nicht mehr als impulshaftes Rammereignis (MSRL, Deskriptor 11.1), sondern als Dauerschallereignis (MSRL, Deskriptor 11.2) messtechnisch erfasst wird.

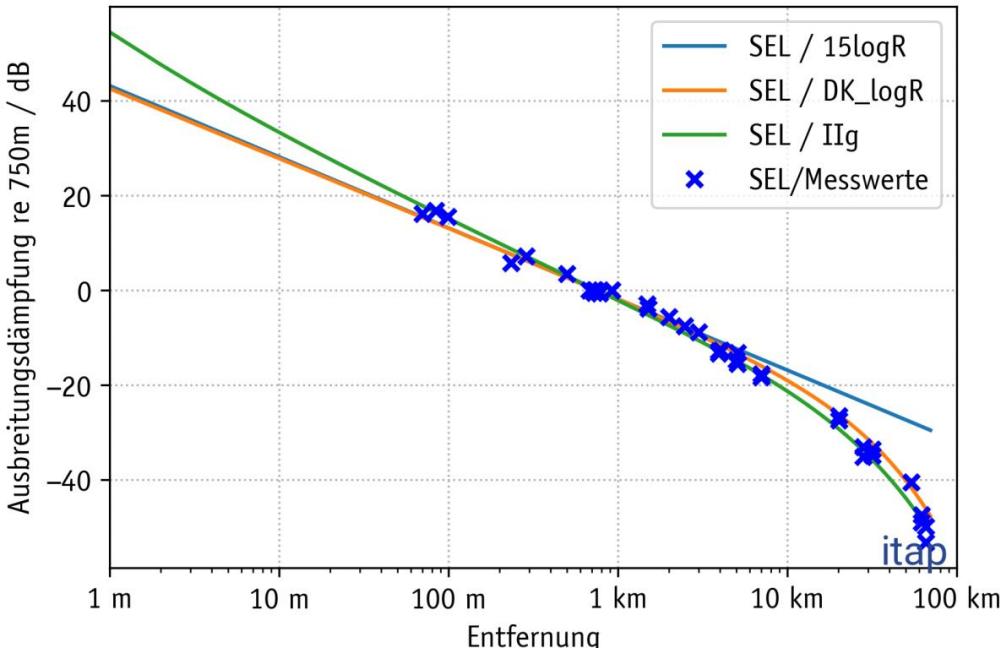


Abbildung 5: *Verschiedene, prognostizierte Ausbreitungsdämpfungskurven (durchgezogene Linien) für Flachwasser: allgemeine, geometrische Ausbreitungsdämpfung (konservativer Ansatz; 15 log R), semi-empirischer Ansatz definiert in Danish Energy Agency (2016) (DK_log R) und semi-empirischer Ansatz von Thiele und Schellstede (1980) für flaches Gewässer, „glatte" See (IIg) im Vergleich zu bestehenden Offshore-Messdaten (blaue Kreuze). (R – Abstands-verhältnis).*

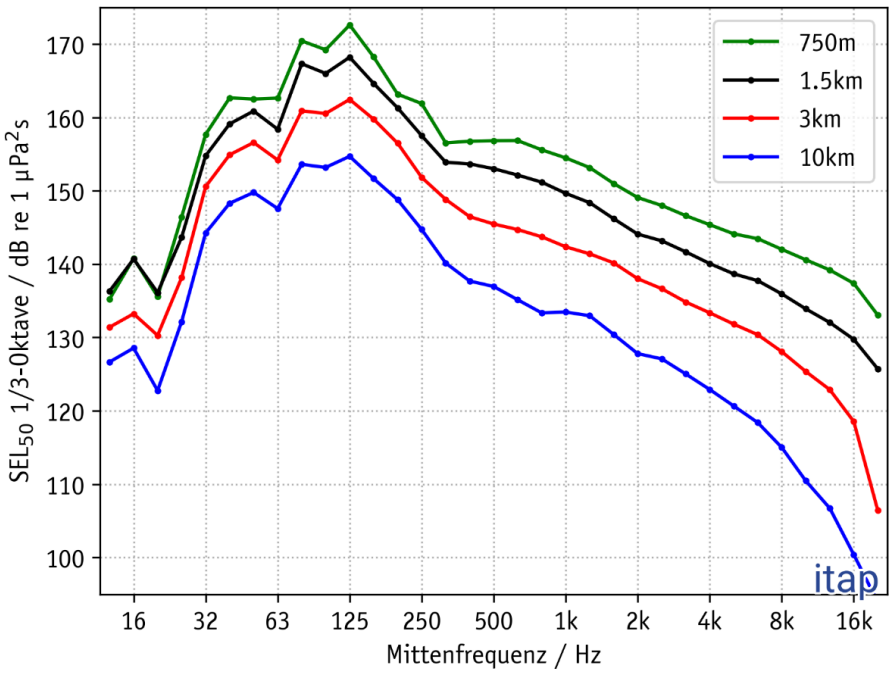


Abbildung 6: *In verschiedenen Entfernungen gemessene, mittlere 1/3-Oktav-Spektren während der Gründungsphase eines Monopfahls im Impulsrammverfahren.*

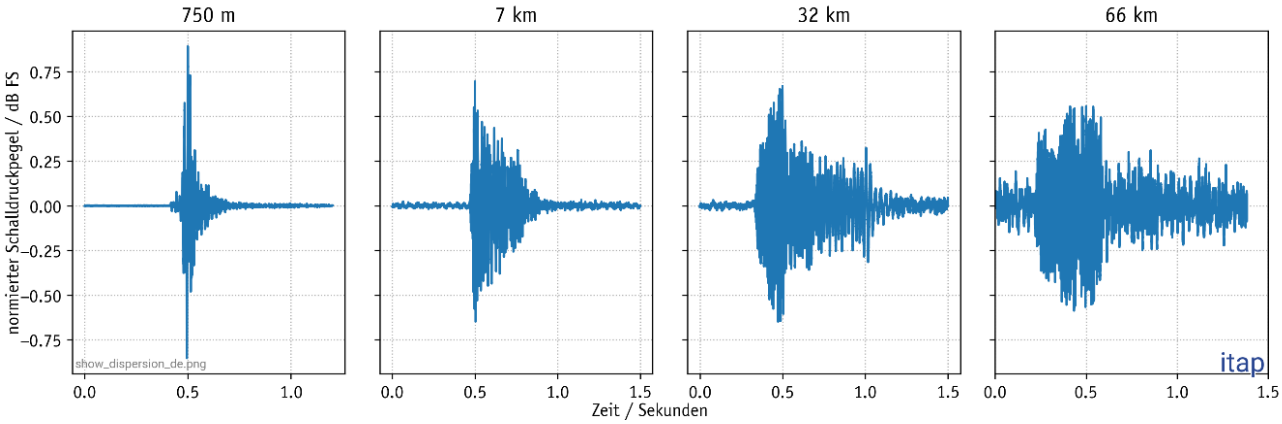


Abbildung 7: *Zeitsignal eines einzelnen Rammschlags, gemessen in unterschiedlichen Entfernungen zum Fundament.*

Exkurs: Schallausbreitung in der Ostsee

Aufgrund der geographischen Lage der Ostsee findet kaum ein Austausch mit Wasser aus dem Atlantischen Ozean statt. Im Vergleich zur Nordsee, in der das Atlantikwasser gleich aus zwei Richtungen einströmt und eine ständige Durchmischung gewährleistet ist, sind die Strömungen in der Ostsee in erster Linie das Resultat von Wettereinflüssen. So kann ein langanhaltender Wind aus Nordwesten viel Wasser in die Ostsee drücken. Sobald sich die Windrichtung ändert oder Windstille eintritt, fließt das Wasser wieder aus der Ostsee. Dies hat zur Folge, dass es gerade in den Sommermonaten zu Strömungsbedingungen kommen kann, bei denen eine vollständige Durchmischung des Wassers, wie sie für die angenommene Ausbreitungsdämpfung nach Gleichung 11 vorausgesetzt wird, nicht mehr gewährleistet ist. Stattdessen ist es möglich, dass sich im Wasser Schichtungen von unterschiedlichem Salzgehalt und unterschiedlicher Temperatur bilden können. Hieraus ergibt sich ein ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil über die gesamte Wassersäule.

Infolge der unterschiedlichen Schichtungen können sich Kanäle bilden, in denen sich die Schallwellen mit einer deutlich geringeren Dämpfung ausbreiten können. Diese sogenannten „Schallkanäle“ entstehen in Bereichen, in denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls niedriger ist als in den darüber- und darunterliegenden Schichtungen. Da sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls unter Wasser mit zunehmender Temperatur und Salinität erhöht, kommt es an den Übergängen zweier Schichtungen zu einer Beugung des Schalls in Richtung der Schicht mit der geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit. Tritt dieser Effekt an zwei gegenüberliegenden Grenzschichten auf (z. B. oben: höhere Temperatur, unten: höherer Salzgehalt), kann sich der Schall aufgrund einer gerichteteren Verteilung der vorhandenen Schallleistung und geringerer Verluste durch Reflexionen innerhalb dieser Schichtung mit einer deutlich geringeren Ausbreitungsdämpfung ausbreiten. Es entsteht ein „Schallkanal“. Dies funktioniert jedoch nur, wenn die Wellenlängen im Verhältnis zur Höhe des Schallkanals nicht zu groß sind. Damit die Schallimmissionen von Rammschlägen, die üblicherweise im Frequenzbereich << 500 Hz (Abbildung 14 in Kapitel 5.2.1) liegen, in solchen Kanälen übertragen werden können,

wären Schallkanäle mit einer vertikalen Ausdehnung von >> 30 m erforderlich (Johnson, 1982). Dies ist bei Wassertiefen in der deutschen AWZ der Ostsee von bis zu 45 m höchst unwahrscheinlich.

Die deutsche Marine (Wehrtechnischer Dienst – WTD71) konnte in wenig befahrenen Bereichen der Ostsee den Einfluss von derartigen Schallkanälen auf akustische Signale mehrfach messtechnisch nachweisen[8]. Der Effekt der Schallkanäle betrug 10 dB und mehr auf einer Distanz von mehreren Kilometern. D. h., Schall innerhalb des Schallkanals wurde um 10 dB weniger bei der Schallausbreitung über mehrere Kilometer in der Amplitude reduziert als Schall ober- und unterhalb dieses Schallkanals. Jedoch wurde in der Studie deutlich darauf hingewiesen, dass es sich bei den Testsignalen nicht um tieffrequenten Rammschall, sondern um (Sinus- oder Puls-) Signale in Frequenzbereichen von mehreren kHz handelte (Sonar). Es wurde jedoch auch klar herausgestellt, dass die Anwesenheit derartiger Schallkanäle von definierten Wasserbedingungen abhängig ist, die sich z. B. durch eine Schiffsvorbeifahrt aufgrund der durch den Antrieb verursachten Durchmischung stark ändern können. Zudem betrug die vertikale Ausdehnung dieser Schallkanäle nur wenige Meter. Somit sind die dort eingesetzten Schallsignale um einen Faktor 10 und mehr in der Frequenz höher als der im vorliegenden Bericht betrachtete Rammschall.

> *Technische Anmerkung:* Bei den Versuchen der Bundeswehr ist zudem eine Punktschallquelle verwendet worden; ein zu rammender Pfahl stellt hingegen eine räumlich ausgedehnte Linienschallquelle dar. Es ist derzeit nicht geklärt, welchen Einfluss die Art der Quelle auf die Ankopplung des abgestrahlten Rammschalls an derartige Schallkanäle hat.

In einem abgeschlossenen OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Ostsee wurden entsprechende Messungen der Salz-, Temperatur- und Schallgeschwindigkeitsprofile über die Wassertiefe an mehreren Tagen und Messpositionen mittels CTD-Sonden[9] messtechnisch erfasst. Diese Messungen wurden im Rahmen der Baugenehmigung seitens des BSH angeordnet. Bei einer Messung im Spätsommer, nach einer langanhaltenden „Schönwetter-Periode", konnte einmalig ein Schallkanal messtechnisch erfasst werden. Die Ausdehnung dieses Kanals betrug ca. 10 m in der Höhe. Zu dem Zeitpunkt wurde der Unterwasserschall zeitgleich in drei unterschiedlichen Höhen über Grund während der Rammaktivitäten einer Monopfahl-Installation aufgezeichnet. Dabei befanden sich ein Hydrophon unterhalb des Schallkanals, ein Hydrophon in der Mitte und ein Hydrophon am oberen Rand des Schallkanals, Abbildung 8. Die Messergebnisse bei dieser Rammung in mehreren Hydrophonhöhen in einem Abstand von 750 m zur Quelle wiesen jedoch nur eine Varianz von < 2 dB auf, was sich im Bereich der allg. Messunsicherheit befindet.

[8] Vortrag der WTD71 auf der 2. DUH Schallschutztagung, Berlin, 2014.

[9] CTD-Sonden werden zur Erfassung der Wassertiefe, der Leitfähigkeit bzw. des Salzgehalts und der Temperatur im Wasser eingesetzt. Durch die Erfassung der o. g. Parameter kann die Schallgeschwindigkeit als Funktion der Wassertiefe bestimmt werden.

Langzeituntersuchungen in der Ostsee zeigen, dass derartige Schallkanäle zeitlich als sehr instabil anzusehen sind, da z. B. durch Strömung, Wind oder das Fahren eines Schiffes (Schiffsschraube) zumeist eine zumindest teilweise Durchmischung der Wassersäule stattfindet. Einen Überblick über die zeitliche Variabilität bzw. die innerhalb von Stunden rasche Veränderung von Temperatur und Salzgehalt ist anhand der Daten aus dem Meeresumweltmessnetz des BSH abzulesen, die u. a. Daten der Messplattform FINO2 beinhaltet

(https://www.bsh.de/DE/DATEN/Meeresumweltmessnetz/meeresumweltmessnetz_node.html).

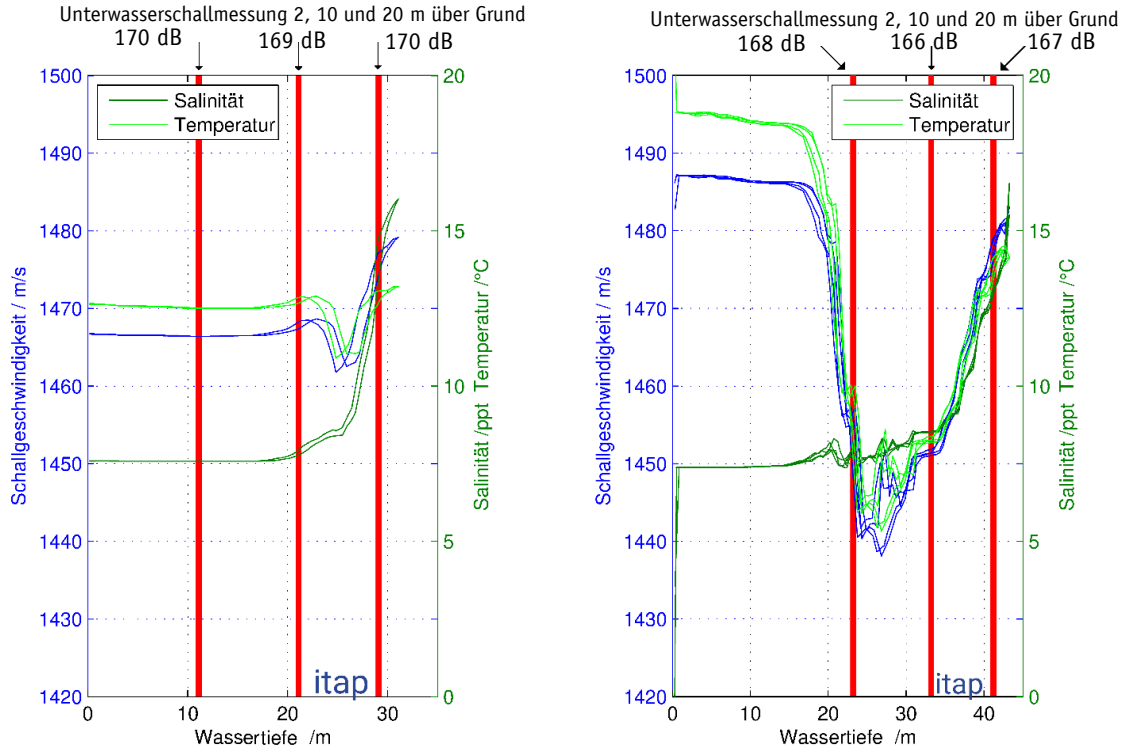


Abbildung 8: *Wassertiefenabhängige Schallgeschwindigkeitsprofile, gemessen in der Ostsee nach einer langanhaltenden Schönwetter-Periode (rechts) und nach vollständiger Durchmischung der Wassersäule (links). Zudem wurden während der Rammarbeiten Unterwasserschallmessungen in drei unterschiedlichen Hydrophonhöhen über Grund (2 m, 10 m und 20 m über Grund bei einer Wassertiefe von 31 m links und 43 m rechts LAT) durchgeführt (rote Linien).*

5.1.6 Einfluss der Hydrophonhöhe im akustischen Fernfeld

Laut deutscher Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen (BSH, 2011) und der ISO 18406 (2017) sind Hydrophone in der unteren Wasserhälfte mindestens 2 m über dem Meeresgrund zu positionieren. In dem F&E-Forschungsvorhaben BORA[4] wurden in unterschiedlichen Raumrichtungen und Entfernungen zur Rammbaustelle pro Messposition zwei Hydrophone (2 und 10 m über Grund, Wassertiefen in allen drei OWP-Bauvorhaben > 20 m, deutsche AWZ der Nordsee) ausgebracht. Es stellte sich über

sämtliche Messdaten kein signifikanter Einfluss der Hydrophonhöhe über Grund auf die Schallmesswerte ein. Unsystematische, maximale Pegelunterschiede von bis zu ± 2 dB konnten vereinzelt festgestellt werden. Dies wurde ebenfalls durch ein Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Nordsee aus dem Jahr 2014 bestätigt, bei dem teilweise Unterwasserschallmessungen in 2,5 und 10 m über Grund bei einer Wassertiefe von > 20 m (LAT) durchgeführt wurden.

Im F&E-Vorhaben ESRa[10] sowie im F&E-Vorhaben BORA[4] wurde ein sogenanntes „Hydrophon Line-Array" mit bis zu 16 Hydrophonen in jeweils 1,5 bis 2,0 m vertikalen Abstand in der Wassersäule aufgespannt. Dieses Line-Array wurde im akustischen Nahfeld in Entfernungen bis 80 m zur Pfahlinstallation ausgebracht und die verwendeten Hydrophone deckten nahezu die gesamte Wassersäule ab. Bei diesen Messungen zeigte sich, dass sich in der unteren Wasserhälfte der Gesamtpegel nicht wesentlich änderte (unsystematische Pegelunterschiede von bis zu ± 2 dB), jedoch in der oberen Wasserhälfte der Gesamtpegel stetig zur Wasseroberfläche abnahm (Wilke et al., 2012; Bellmann et al., 2013 & 2015; Gündert et al., 2013). Es konnten Unterschiede von mindestens 5 dB bis hin zu > 10 dB in der Nähe zur Wasseroberfläche messtechnisch erfasst werden; siehe Abbildung 9. Der Grund dafür ist der große Impedanzsprung an der Wasseroberfläche zwischen Luft und Wasser.

In Abbildung 10 ist zudem ein gemitteltes 1/3-Oktav-Spektrum einer Monopfahl-Installation mittels Impulsrammverfahren dargestellt, gemessen in 750 m Entfernung in zwei unterschiedlichen Messhöhen innerhalb der unteren Wassersäule. Es zeigt sich, dass die Messvarianz in einzelnen Frequenzbändern lediglich im Bereich von wenigen Dezibel liegt.

In Abbildung 10 ist das gemittelte 1/3-Oktav-Spektrum des Einzelereignispegels (SEL_{50}) einer Monopfahl-Gründung mittels Impulsrammverfahren, gemessen in 750 m in zwei unterschiedlichen Messhöhen (2 m und 10 m über Grund bei einer Wassertiefe von größer 20 m), dargestellt. Es zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der beiden gezeigten 1/3-Oktav-Spektren.

Mit der in den Regelwerken (BSH, 2011; ISO 18406, 2017) definierten Hydrophonhöhe von mindestens 2 m über dem Meeresgrund und innerhalb der unteren Wasserhälfte wird somit der „lauteste", messtechnisch zu erfassende Fall bei einer Impulsrammung im Flachwasser erfasst.

[10] ESRa – Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl; technischer Abschlussbericht, gefördert durch BMU und PTJ, FKZ 0325307.

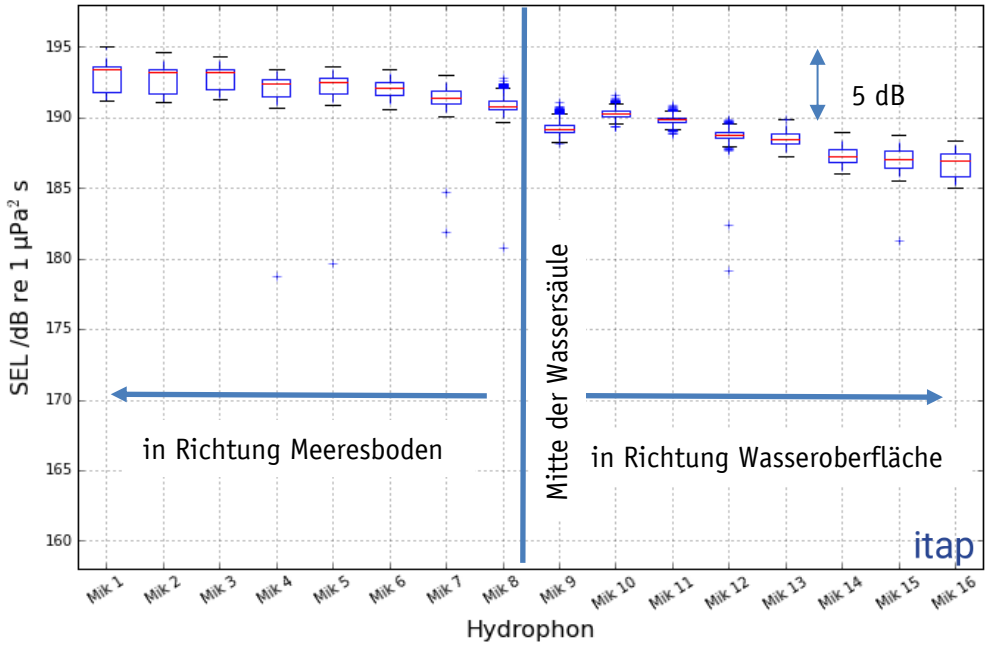


Abbildung 9: *Statistische Darstellung (Boxplot) des gemessenen Einzelereignispegels (L_E bzw. SEL) mit 16 Hydrophonen von ca. 2 m über Grund bis zur Wasseroberfläche bei einer Impulsrammung eines Monopfahls ohne Einsatz eines technischen Schallschutzsystems in einem Abstand von ca. 80 m zur Rammung innerhalb der dt. AWZ der Nordsee. Mik1 kennzeichnet das Hydrophon 1 in 2 m über Grund; sämtliche weiteren Hydrophone befanden sich jeweils in einem vertikalen Abstand von 1,5 m zueinander; Wassertiefe ~ 30 m.*

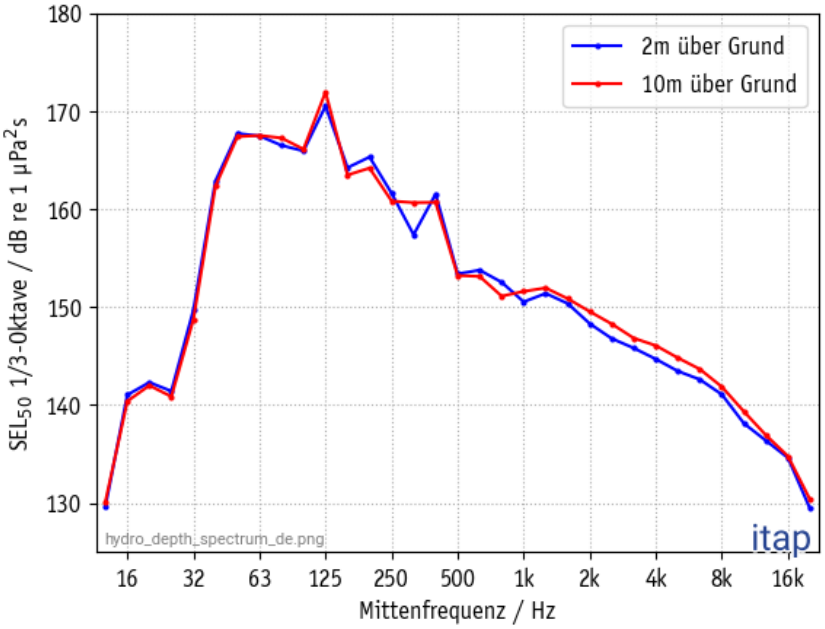


Abbildung 10: *Gemitteltes 1/3-Oktav-Spektrum des Einzelereignispegels (SEL_{50}) einer Monopfahl-Gründung mittels Impulsrammverfahren, gemessen in 750 m in zwei unterschiedlichen Messhöhen (2 m und 10 m über Grund bei einer Wassertiefe von größer 20 m).*

5.2 Technisch-konstruktive Einflussfaktoren

5.2.1 Fundament- und Pfahl-Design

In Abbildung 11 sind unterschiedliche Fundamentstrukturen für OWEA schematisch zusammengefasst. Dabei werden die notwendigen Pfähle für ein Tripod, eine Jacket-Konstruktion, ein Tripile und ein Monopile (Monopfahl) i. d. R. mittels Impulsrammverfahren im Meeresboden verankert. Je nach Konstruktion und technischer Ausführung sind für eine schwimmende Fundamentstruktur sowie für ein Schwerkraftfundament keine Anker bzw. Pfähle im Meeresboden mittels Impulsrammverfahren notwendig. Schwimmende Fundamentstrukturen sowie Schwerkraftfundamente gehören zu den alternativen, schallarmen Gründungsstrukturen und werden in Kapitel 7.4.3 thematisiert.

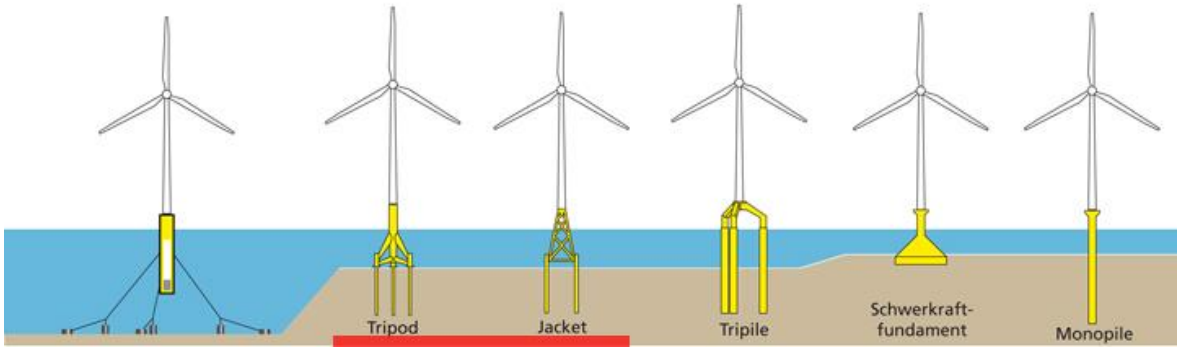


Abbildung 11: *Unterschiedliche Fundamentstrukturen für OWEA (Quelle: Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE).*

In Abbildung 12 sind die in 750 m Entfernung zum Fundamentstandort gemessenen Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL) und Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) als Funktion des verwendeten Pfahldurchmessers bei ungedämmten Impulsrammungen dargestellt. Die Einträge der MarinEARS[2] wurden zudem für diese Abbildung durch weitere Unterwasserschallmessungen der *itap GmbH* aus der Nord- und Ostsee innerhalb der 12-Seemeilen-Zone und im europäischen Ausland, insbesondere für kleinere Pfahldurchmesser, ergänzt. Hierbei wurden zunächst keine Unterschiede im Fundament-Design vorgenommen, d. h. sowohl Monopfähle, als auch Gründungspfähle für Tripods und Jacket-Konstruktionen sowie Tripiles wurden berücksichtigt.

Es zeigt sich, dass mit ansteigendem Pfahldurchmesser auch die gemessenen Schallpegelwerte ansteigen. Das 95-%-Konfidenzintervall sämtlicher erfasster (Impuls-) Rammungen beträgt ± 5 dB, nur in Abhängigkeit vom Parameter „Pfahldurchmesser“. Zudem zeigt sich, dass bei gleichem Pfahldurchmesser die gemessenen Schallpegelwerte um bis zu 8 dB voneinander abweichen kann. Es ist somit anzunehmen, dass der Pfahldurchmesser zwar ein dominanter Einflussparameter für Rammschall ist, aber weitere Parameter den breitbandigen Gesamtpegel mitbestimmen.

In Abbildung 13 werden Monopfahl-Installationen mit Durchmessern größer 5 m (rechts) und andere Pfähle (z. B. Tripiles, Gründungspfähle für Jacket-Konstruktionen) mit Durchmessern kleiner 4 m (links) separat betrachtet. Bei den Monopfahl-Installationen liegen umfängliche Informationen über den Rammprozess und die eingesetzten Rammhämmer vor. Es zeigt sich, dass tendenziell die gemessenen Schallpegelwerte mit steigendem Pfahldurchmesser geringfügig ansteigen. Es zeigt sich bei kleinen Pfahldurchmessern mit unterschiedlichen Pfahl-Designs (linke Abbildung) tendenziell ein deutlich stärkerer Einfluss des Pfahldurchmessers auf die zu messenden Schallpegelwerte in 750 m. Für diese Messdaten liegen jedoch z. T. nicht sämtliche Informationen über die technisch-konstruktiven Einflussfaktoren, wie z. B. den Rammprozess und die eingesetzten Rammhämmer vor. Es ist somit nicht auszuschließen, dass die z. T. hohen Pegel bei geringen Pfahl-durchmessern durch technisch-konstruktive Einflussfaktoren, wie z. B. Ankopplungseffekte der Gründungspfähle an die Jacket-Konstruktion, nachhaltig beeinflusst sind.

Abbildung 14 zeigt, dass sich mit dem Pfahldurchmesser nicht nur der breitbandige Schallpegel, sondern auch die spektrale Zusammensetzung des Rammschalls in 750 m Abstand ändert. Tendenziell ergibt sich bei maximalen Pfahldurchmessern von 3,5 m (i. d. R. Gründungspfähle für Jacket-Fundamente) ein Maximum im 1/3-Oktav-Spektrum im Frequenzbereich von ca. 160 Hz. Zu höheren und niedrigeren Frequenzen nimmt der Schallpegel in etwa mit 6 dB pro Oktave stetig ab. Bei Frequenzen < 50 Hz fällt der Pegelabfall nochmals deutlich größer aus und ist von der vorhandenen Wassertiefe abhängig.

Mit zunehmendem Pfahldurchmesser (Monopfähle) verschiebt sich das Maximum im Spektrum von ca. 160 Hz zu tieferen Frequenzen. Rammungen mit Monopfählen von Durchmessern größer 6 m zeigen zum Teil ein Maximum bei unter 100 Hz. Auch der qualitative Pegelverlauf verändert sich zu höheren Frequenzen etwas. Die Pegelabnahme bzw. -zunahme um das Maximum beträgt annäherungsweise 12 dB pro Oktave anstatt 6 dB pro Oktave.

Die gezeigten Daten in Abbildung 13 sind im breitbandigen Gesamtschallpegel mit Bezug auf die verwendete Rammenergie normiert und zeigen annähernd gleiche (normierte) Breitbandpegel (siehe Kapitel 5.2.2). Jedoch zeigt sich unabhängig von der Verschiebung des Maximums zu tiefen Frequenzen eine hohe Messvarianz von bis zu ± 10 dB in einzelnen Frequenzbändern bei vergleichbaren Pfahldurchmessern; dies gilt insbesondere bei Frequenzen größer 1 kHz.

I. d. R. nimmt mit dem Durchmesser der Pfähle auch die notwendige Rammenergie und damit die Größe des verwendeten Rammhammers zu. Insbesondere sind nicht nur höhere Rammschlagenergien zur Überwindung des Bodenwiderstands notwendig, sondern es sind auch deutlich größere Rammhauben (engl. anvil) für den Übergang Rammhammer/Pfahl notwendig. Nach ersten Erkenntnissen kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Verschiebung des Maximums im Rammschall mit zunehmendem Pfahldurchmesser durch den Pfahldurchmesser selbst, die Rammhaube und/oder den Typ und die Größe des Rammhammers bedingt wird. Es ist anzunehmen, dass die drei genannten Parameter linear abhängig voneinander sind; siehe Kapitel 5.2.2.

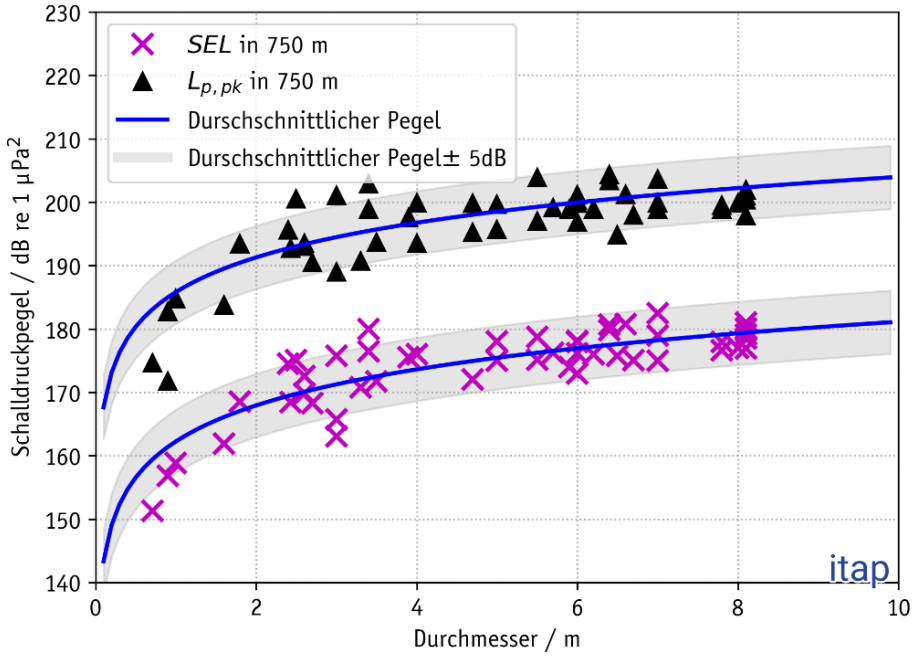


Abbildung 12: *Gemessene Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL_{05}) bei Gründungsarbeiten an Pfählen unterschiedlicher Fundamentstruktur im Impulsrammverfahren diverser OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers. Sämtliche Rammungen wurden ohne den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen durchgeführt.*

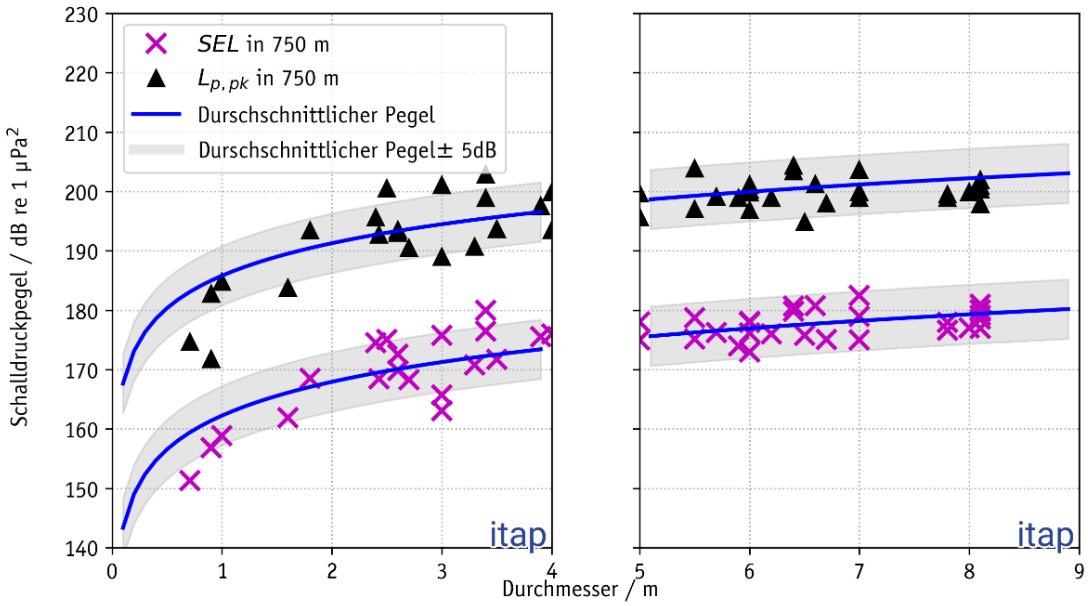


Abbildung 13: *Gemessene Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL_{05}) bei Gründungsarbeiten links: von unterschiedlichen Pfahl-Designs mit Pfahldurchmessern von bis zu 4 m und rechts ausschließlich von Monopfählen mit Pfahldurchmessern ≥ 5,0 m im Impulsrammverfahren diverser OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers. Sämtliche Rammungen wurden ohne den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen durchgeführt.*

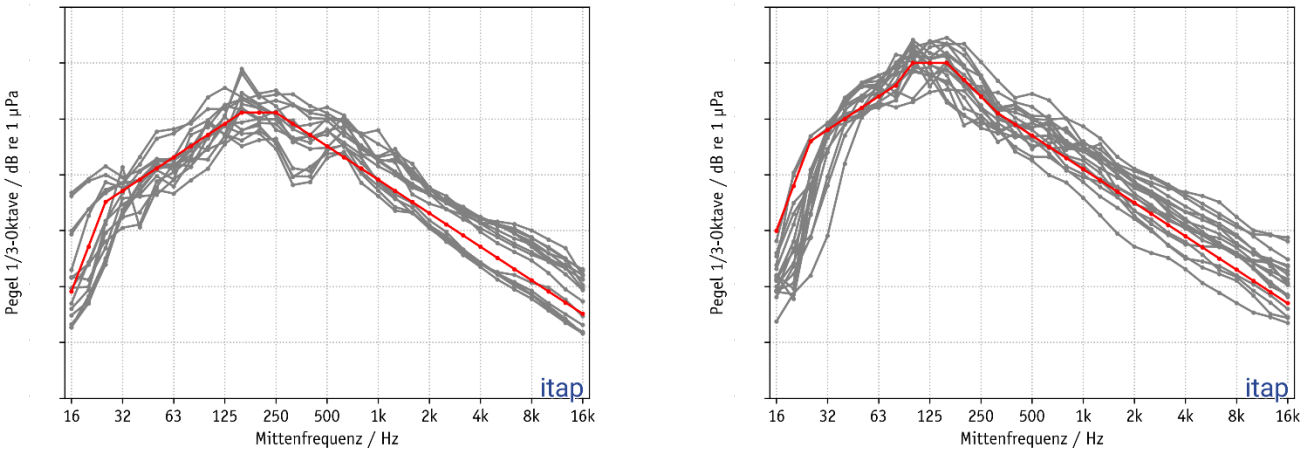


Abbildung 14: *1/3-Oktav-Spektren von mehreren Impulsrammungen in unterschiedlichen OWP Bauvorhaben, gemessen in 750 m Abstand. Die Rammungen wurden ohne den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen durchgeführt. Links: grau schattierte Linien kennzeichnen reale Messdaten von verschiedenen Pfahldurchmessern bis zu einem maximalen Durchmesser von ca. 3,5 m (Pfähle für Jackets); die rote Linie charakterisiert ein gemitteltes, theoretisches Modellspektrum. Rechts: grau schattierte Linien kennzeichnen reale Messdaten von verschiedenen Durchmessern (minimal 6 m, Monopfähle); die rote Linie charakterisiert das gemittelte theoretische Modellspektrum (Median).*

Es ist anzumerken, dass bei der Verwendung von Pfahldurchmessern kleiner 4 m (vorwiegend Pfähle für Jacket-Konstruktionen) zumeist Rammschablonen oder die Pfähle direkt durch die dafür vorgesehenen Pfahlführungen (engl. pile sleeve) an der Jacket-Konstruktion gerammt wurden, so dass ein Einfluss dieser Rammmethode auf das Rammschallspektrum ebenfalls möglich ist; siehe Kapitel 5.2.3.

Zudem können die Standorteigenschaften und Umgebungsvariablen ebenfalls einen Einfluss auf das jeweilige Rammschallspektrum haben; siehe Kapitel 5.1.

Technische Anmerkung: Bisher wurden in der deutschen AWZ keine geneigten Pfähle, d. h. schräg in den Boden eingerammte Pfähle, installiert. Somit kann zu diesem Pfahl-Design derzeit keine Aussage getroffen werden.

Technische Anmerkung: I. d. R. beträgt der Übergang zwischen Monopfahl-Kopf und dem Übergangsstück zwischen dem Gründungspfahl und dem Turm einer OWEA (engl. transition piece) 6 bis 6,5 m. Bei den bisherigen großen Monopfählen mit einem Durchmesser von bis zu 8 m gab es somit zum Pfahlkopf hin eine geringfügige Verjüngung, die sich zumeist im Bereich der Wasseroberfläche befindet. Der Einfluss einer Pfahlverjüngung innerhalb der Wassersäule bei einer Impulsrammung wurde somit bisher in der deutschen AWZ noch nicht untersucht.

5.2.2 Rammhammer, Rammenergie und Rammprozess

Die Rammhammer–Pfahl-Interaktion während der Impulsrammung ist ein sehr komplexer Vorgang, der in diesem technischen Bericht nicht vollständig diskutiert wird. Es sollen im Nachfolgenden die wesentlichen Einflussparameter auf den Rammschall, die sich bei der projektübergreifenden Analyse sämtlicher Messdaten über den gesamten Rammprozess gezeigt haben, dokumentiert werden. Dabei wird im Wesentlichen auf folgende Sachverhalte eingegangen:

- Rammenergie, inkl. Soft-Start und „schalloptimiertes" Rammverfahren,
- Terzspektrum der Einzelereignispegel im Verlauf einer Rammung,
- Rammhammertyp bzw. -größe,
- Einbindetiefe des Pfahls.

Rammenergie ./. Einzelereignispegel

In Abbildung 15 ist eine vollständige (Impuls-) Rammung eines Monopfahls in Abhängigkeit der verwendeten Rammenergie bzw. in Abhängigkeit der Einbindetiefe dargestellt. Bei deutschen OWP-Bauvorhaben beginnt die Rammung i. d. R. mit einem Soft-Start, d. h. mit ca. 10 % Kapazität des

> *Technische Anmerkung:* Der Soft-Start ist in Deutschland ein fester Bestandteil des zwingend notwendigen Vergrämungskonzeptes, bestehend aus dem Einsatz von akustischen Vergrämern (kombiniertes Pinger-Seal Scarer-System oder ab 2017 Fauna-Guard-System) und dem Soft-Start. Der Soft-Start wird in einen kontinuierlichen Rammprozess überführt (engl. ramp-up Prozedur), in dem die Rammenergie des Rammhammers stufenweise angehoben wird und die Schlagwiederholungsfrequenz ausgehend von Einzelschlägen sukzessive erhöht wird (kontinuierlicher Rammprozess).

eingesetzten Impulshammers (i. d. R. weniger als 400 kJ), bei dem zunächst kein oder nur ein geringer Pfahlvortrieb erreicht wird. Damit soll eine zusätzliche stufenweise, akustische Vergrämung von marinen Säugetieren erzielt werden. Zumeist werden bei einem Soft-Start nur einzelne Rammschläge mit größeren Pausen ausgeführt.

Abbildung 15 zeigt, dass zum einen mit ansteigender Rammenergie der Einzelereignispegel in einer Entfernung von 750 m zur Monopfahl-Installation innerhalb des sogenannten Ramp-up-Verfahrens, also dem stetigen Anstieg der verwendeten Rammenergie und der zeitgleichen Anhebung der Schlagwiederholungsfrequenz zu Beginn einer Rammung, stetig ansteigt und später annähernd konstant bleibt bzw. dieser Anstieg deutlich abflacht. Zum anderen zeigt sich, dass es eine signifikante Korrelation zwischen der zwingend notwendigen, einzusetzenden Rammenergie und der Einbindetiefe bei Rammungen in der Nordsee (unterschiedlich dicht gelagerte Sande unterschiedlicher Mächtigkeit) existiert. Die Rammenergie muss meistens mit zunehmender Einbindetiefe erhöht werden, um den

Bodenwiderstand stetig zu überwinden. Generell zeigten sich bei allen bisherigen OWP-Bauvorhaben aus der deutschen Nordsee, dass der Einzelereignispegel entweder bis zur Erreichung der maximalen Einbindetiefe und mit steigender Rammenergie

(i) stetig anstieg,
(ii) nach ca. 75 % der Rammung nahezu konstant blieb oder
(iii) nach ca. 75 % geringfügig abnahm (< 1 dB).

Insgesamt lagen die Einzelereignispegel bei Erreichung der maximalen Einbindetiefe unter Berücksichtigung der verwendeten Rammenergie und des Pfahldurchmessers in einem Konfidenzintervall im Bereich der Messungenauigkeit. Der Grund für den Anstieg, den konstanten Verlauf bzw. den geringfügigen Abfall zum Rammende konnte bisher weder mit dem Bodenwiderstand, dem eingesetzten Rammhammer oder einem weiteren Einflussparameter eindeutig in Verbindung gebracht werden.

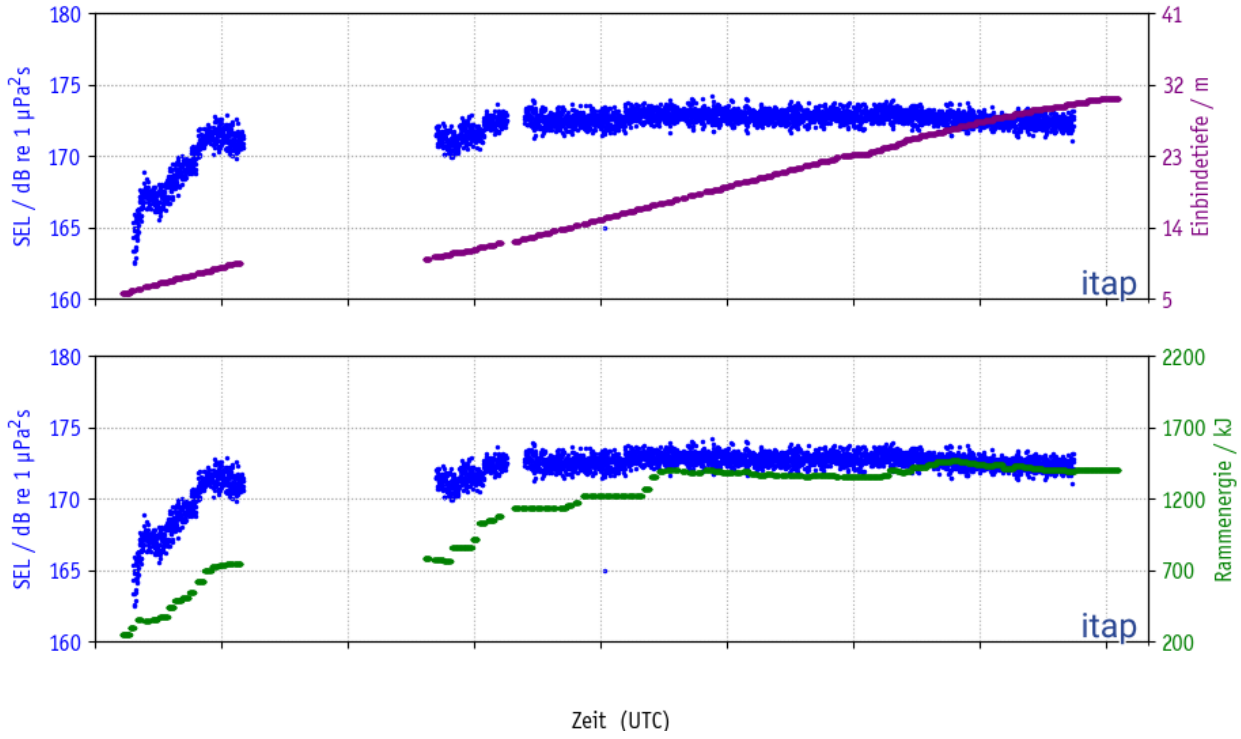


Abbildung 15: *Gemessener Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL) in 750 m während einer Monopfahl-Installation als Funktion der Zeit. Die Rammung wurde ohne den Einsatz eines technischen Schallschutzsystems durchgeführt. Zusätzlich ist die verwendete Rammenergie pro Rammschlag (unten) und die erreichte Einbindetiefe (oben) dargestellt.*

In mehreren Studien (Gündert et al., 2014; Brandt et al., 2011) wurde ein Pegelanstieg von 2 bis 3 dB pro Verdopplung der Rammenergie bei einer kontinuierlichen Pfahlrammung publiziert. Eine erste, statistische Auswertung von Unterwasserschallmessdaten sämtlicher deutscher OWP-Bauvorhaben im

Fachinformationssystem MarinEARS[2] konnte diese Werte bestätigen. Es zeigte sich allerdings auch, dass bei längerfristigen Rammunterbrechungen dieser Zusammenhang nicht immer zutreffend ist. Hintergrund ist, dass der vorhandene Bodenwiderstand bei Wiederbeginn der Rammung zunächst überwunden werden muss und i. d. R. etwas höhere Schallpegel zu erwarten sind.

Soft-Start ./. Einzelereignispegel

In der überwiegenden Mehrheit der Bauvorhaben dauerte der Soft-Start weniger als 15 Min. Je nach Hammertyp erreichte dabei die Rammenergie ca. 10 % der Kapazität des Hammers. Der Einzelereignispegel in 750 m erreichte dabei i. d. R. die niedrigsten Werte innerhalb des gesamten Rammprozesses. Bei mehreren Rammungen betrug dabei der Signal-Rausch-Abstand zwischen Einzelereignis-pegel des Soft-Starts und dem permanenten Hintergrundschallpegel weniger als 10 dB.

> *Technischer Hinweis:* In einem OWP-Bauvorhaben in der Ostsee mit einem optimalen Schallschutzkonzept, bestehend aus schalloptimiertem Rammverfahren inkl. Rammhammertyp, einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem, betrug der Signal-Rausch-Abstand während des Soft-Start zumeist << 6 dB, so dass keine fehlerfreien Einzelereignispegel für diese ersten Rammschläge berechnet werden konnten. Ähnliche Ereignisse haben sich in den letzten Jahren auch in der Nordsee abgezeichnet, d. h. die eingesetzten Schallschutzkonzepte sind derart effizient, dass sich bei geringen Rammenergien der Rammschall selbst in einer Entfernung von 750 m von der Quelle nicht wesentlich vom permanenten Hintergrundgeräusch absetzt.

Es zeigte sich in einzelnen Bauvorhaben, dass teilweise höhere Einzelereignispegel beim Soft-Start als durch die verwendete geringe Rammenergie zu erwartende Einzelereignispegel gemessen wurden; siehe Abbildung 16. Eine wissenschaftlich fundierte Begründung für dieses Phänomen existiert im Moment nicht. Bisher konnten noch keine eindeutigen Zuordnungen zum Rammhammertyp bzw. zur Rammhammergröße, zum Bodenwiderstand oder anderen Parametern statistisch valide hergestellt werden. Eine unerwünschte Interaktion zwischen Pfahl, Rammhammer und ggf. Pfahlführung kann derzeit als Grund für die unerwartet hohen Einzelereignispegel während des Soft-Starts nicht ausgeschlossen werden.

„Schalloptimiertes“ Rammverfahren

In Deutschland wurde aus naturschutzfachlichen Gründen zusätzlich zu dem Lärmschutzwertkriterium von 160 dB_{SEL} und 190 $dB_{Lp,pk}$ in einer Entfernung von 750 m eine maximale Rammdauer von 180 Minuten pro Monopfahl-Installation definiert. Diese 180-Minuten-Rammdauer beinhaltet eine akustische Vergrämung (variierte bis 2019 zwischen 20 bis 50 Min. je nach eingesetztem Vergrämungsgerät und Maßgabe des BSH), einem Soft-Start (i. d. R. um die 10 bis 15 Min.) und der anschließenden, kontinuierlichen Rammung inkl. Neigungsmessungen in Lotrichtung am Pfahl bis zur Erreichung der finalen

Einbindetiefe. Zusätzlich wird vom BSH die zulässige, maximale Rammenergie projektspezifisch als weitergehende Schallschutzmaßnahme eingeschränkt (je nach Hammertyp und örtlichen Gegebenheiten; bei Monopfählen bisher $\leq$ 2.000 kJ), um die geforderten Lärmschutzwerte verbindlich einhalten zu können.

Aufgrund der zwingenden Einhaltung der deutschen Lärmschutzwerte, der zeitlichen Einschränkung der Gesamt-Rammdauer sowie der Einschränkung der Rammenergie hat sich somit ein sogenanntes „schalloptimiertes“ Rammverfahren (engl. noise-optimized pile-driving oder smart pile-driving) entwickelt. Dieses schalloptimierte Rammverfahren geht somit mit einer hohen Schlagwiederholungsfrequenz (engl. blow rate) und einer erhöhten Anzahl von Rammschlägen pro definierter Einbindetiefe (engl. blow count) einher. Zudem wird die eingesetzte Rammenergie i. d. R. nur dann stufenweise erhöht, wenn der vorliegende Bodenwiderstand ohne Anhebung der Rammenergie nicht mehr überwunden werden kann und somit kein kontinuierlicher Rammprozess gewährleistet werden kann. Somit wird i. d. R. bei einem schalloptimierten Rammverfahren die eingesetzte Rammenergie pro einzelnem Rammschlag so gering wie nötig gehalten, um die damit verbundene Schallabstrahlung des Pfahls so gering wie möglich zu halten; siehe Abbildung 15. Es darf grundsätzlich nur zur Vermeidung eines Pfahlstillstandes (engl. pile refusal) die behördlich vorgegebene, maximale Rammenergie überschritten werden.

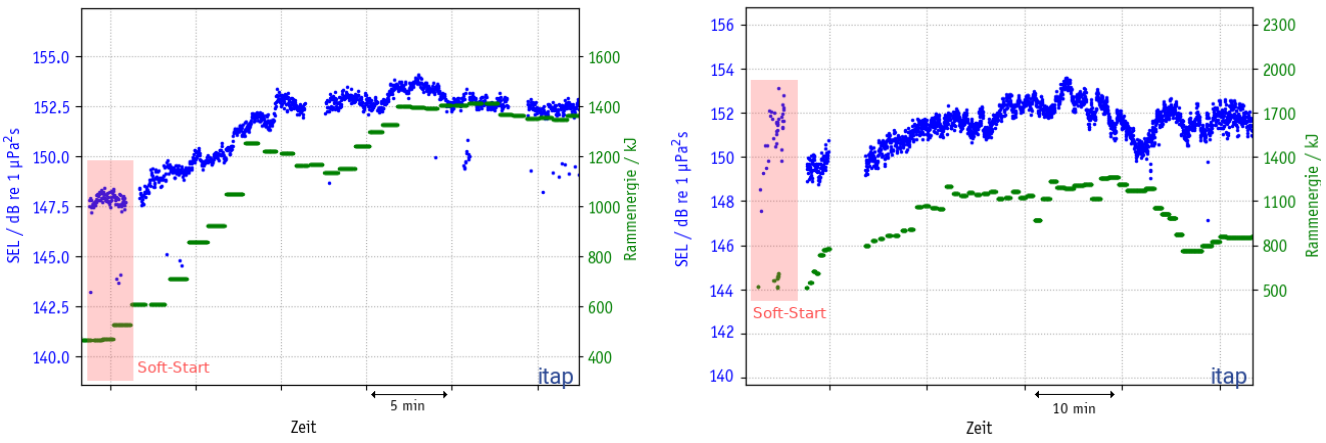


Abbildung 16: *Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels (SEL bzw. L_E) und der verwendeten Rammenergie (grün) während ungeminderter Monopfahl-Installationen in einer Entfernung von 750 m. Links: Der Einfluss der Rammenergie während des Soft-Starts entspricht in etwa einem Pegelanstieg von ca. 2 bis 3 dB pro Verdopplung der Rammenergie. Rechts: Der Einfluss der verwendeten Rammenergie beim Soft-Start ist nicht proportional zur restlichen Rammung.*

Für die Installation von mehr als einem Pfahl pro Fundament, z. B. für eine Jacket-Konstruktion, wird eine maximale Rammdauer von 140 Minuten pro zu rammendem Pfahl inkl. Vergrämungsmaßnahme, falls erforderlich, vorgeschrieben. Sollte die Rammpause zwischen zwei Pfählen weniger als 40 Minuten betragen, so ist i. d. R. für den zweiten Pfahl keine zusätzliche Vergrämungsmaßnahme notwendig.

Beträgt die Rammpause mehr als 40 Minuten, so ist die Vergrämung vor erneutem Rammstart zu wiederholen.

Technische Anmerkung: Bei Nichteinhaltung der geforderten Rammdauer und / oder der begrenzten Rammenergie (z. B. zur Vermeidung eines Installationsstillstandes (engl. pile refusal) muss die Rammenergie kurzzeitig erhöht werden) ist nicht nur ein technischer Abweichungsbericht zu verfassen, sondern sind auch geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um zukünftig beide Maßgaben dauerhaft einzuhalten.

Technischer Hinweis: Wenn durch Unterwasserschallmessungen eindeutig nachgewiesen werden kann, dass die Lärmschutzwerte verbindlich unterschritten werden, so kann eine Erhöhung der maximal erlaubten Rammenergie beantragt werden. Das Risiko einer Überschreitung der verbindlichen Lärmschutzwerte durch erhöhte Rammenergien liegt auf Seiten des OWP-Bauvorhabens.

Ob und in welcher Form ein derartiges, schalloptimiertes Rammverfahren eingesetzt werden kann, hängt in aller erster Linie von der technischen Ausführung des Impulshammers (Hammertyp) und seiner Ansteuerung (Power Packs, Hydraulik, etc.) sowie der Kopplung Rammhammer – Pfahlkopf ab. Zudem sind die Materialermüdungseffekte am zu rammenden Pfahl und dem eingesetzten Rammhammer limitierende Faktoren für ein schalloptimiertes Rammverfahren. Darüber hinaus hängt die Anwendbarkeit und Effektivität dieses Rammverfahrens zusätzlich von mehreren standortspezifischen

Technische Anmerkung: Vor Baustart wird eine sogenannte Rammbarkeitsanalyse (engl. pile-driving analysis – PDA) der zu rammenden Fundamentstrukturen auf der Basis von Bodenprofilen, Pfahl-Design, Erfahrungen, etc. durchgeführt und ist zumeist Bestandteil der Unterlagen für die Zertifizierung des Installationsverfahrens. Ziel einer Rammbarkeitsanalyse ist die Berechnung der maximal notwendigen Rammenergie, um jeden Pfahl pro Bauvorhaben auf die geforderte Endtiefe verbringen zu können, ohne dass der Pfahl signifikante Ermüdung erleidet (engl. fatigue) oder der verwendete Rammhammer zu Schaden kommt. Damit wird auch die mindestens notwendige Kapazität des auszuwählenden Rammhammers projektspezifisch definiert. Daher werden i. d. R. bei den meisten Annahmen für die Rammbarkeitsanalyse entsprechende Sicherheitszuschläge berücksichtigt. Diese Art der Rammbarkeitsanalyse ist jedoch bisher nicht standardisiert und obliegt zumeist einer großen Unsicherheit aufgrund der angenommenen Sicherheitszuschläge und zum Teil nicht vollständig vor Baustart zu erfassenden Eingangsdaten bzgl. der Bodenprofile. Vergleiche der Rammbarkeitsanalysen vor Baustart und den tatsächlichen Rammprofilen während der Gründungsarbeiten zeigten zum Teil erhebliche Abweichungen voneinander, d. h. sowohl höhere und geringere Rammenergien als prognostiziert, als auch kürzere oder längere Rammdauern als prognostiziert (Gündert, 2014).

Randbedingungen, wie z. B. vom vorherrschenden Bodenwiderstand, etc., ab und muss im Einzelfall vorab auf seine Anwendbarkeit geprüft werden.

Das schalloptimierte Rammverfahren stellt somit eine effektive Methode zur Minderung der Schallquelle dar und kann zu den Schallschutzmaßnahmen gezählt werden. Erfahrungen aus den OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ haben gezeigt, dass die Rammenergie z. T. bis auf die Hälfte der prädiktierten, maximalen Rammenergie reduziert werden konnte und damit das Schallminderungspotenzial bis maximal 3 dB abzuschätzen ist. Diese Maßnahme wird somit effektiv zur Einhaltung des Lärmschutzwertkriteriums eingesetzt.

Technische Anmerkung: Seit ca. 2014 wurden in den meisten deutschen OWP-Bauvorhaben sogenannte Unterwasserschall-Echtzeit-Messsysteme (Online-Messungen) in einer Entfernung von 750 m zum Fundament als unterstützende Maßnahme zum schalloptimierten Rammverfahren eingesetzt. Hierbei sieht der jeweilige Rammhammerführer in Echtzeit den Einzelereignispegel und Spitzenpegel des letzten Rammschlages sowie den beurteilungsrelevanten Überschreitungspegel SEL_{05} für die bisherige Rammung. Somit kann bei Erreichung von 160 dB für den Einzelereignispegel geprüft werden, ob ggf. eine Reduzierung der eingesetzten Rammenergie, und damit einer Absenkung des Einzelereignispegels, möglich ist, ohne den Rammprozess zu gefährden (pile refusal). Ein Beispiel ist in Abbildung 26 dargestellt.

Technische Anmerkung: Ab 2016 hat sich eine Schlagwiederholungsfrequenz bei kontinuierlichem Rammprozess von > 40 Rammschlägen pro Minute (bl/min) bewährt. Zudem wurden Methoden entwickelt, um die notwendigen Neigungsmessungen am zu rammenden Pfahl in Lotrichtung auch ohne Rammunterbrechungen durchführen zu können, so dass sich sowohl die Brutto-, als auch die Netto-Rammdauer[1] erheblich verkürzte, um die o. g. Anforderungen hinsichtlich der Rammdauer erfüllen zu können; siehe Abbildung 19.

Technische Anmerkung: Basierend auf den Erfahrungen der letzten Jahre stellte sich die Kombination aus einem sehr großen Rammhammer der neuesten Generation bei einem Einsatz von nur ca. 50 bis 60 % seiner eigentlichen (Gesamt-) Kapazität als besonders effektive Auslegung eines schalloptimierten Rammverfahrens in der Praxis heraus.

Terzspektrum der Einzelereignispegel im Verlauf einer Rammung

In Abbildung 17 ist das 1/3-Oktav-Spektrum (Terzspektrum) einer ungeminderten Monopfahl-Installation, gemessen in einer Entfernung von ca. 750 m, dargestellt. In dieser Abbildung wird der 5-, 50- und 90 %-Überschreitungspegel des Einzelereignispegels ($SEL_{05, 50, 90}$) dargestellt, wobei der SEL_{90}-Pegel zumeist den Rammbeginn (inklusive Soft-Start), der SEL_{50}-Pegel den Rammprozess während der ramp-

up Prozedur, d. h. bis zur Hälfte der Gründungsarbeiten, und der SEL_{05}-Pegel den Rammprozess zum Ende der Rammung mit der höchsten Rammenergie charakterisiert.

Es zeigt sich ein vergleichbarer, spektraler Verlauf über die gesamte Pfahlinstallation, wobei es sich hier um eine Monopfahl-Rammung in der deutschen Nordsee handelt, bei der ein sandiger Boden mit unterschiedlichen Dichten vorlag. Zudem wurde kein Schallschutzsystem verwendet. Es ist somit zu vermuten, dass bei vergleichbaren Bodenschichten mit unterschiedlichen (Boden-) Widerständen weder die Einbindetiefe, noch die verwendete Rammenergie einen merkbaren Einfluss auf die spektrale Form des Rammschalls haben. Rammungen aus der deutschen AWZ der Ostsee mit Sand, Geschiebemergel und Kreide zeigen ebenfalls sehr vergleichbare, spektrale Formen des Rammschalls über den Verlauf der einzelnen Rammungen, obwohl sich die Bodenschichtungen und die damit verbundenen Bodenwiderstände deutlich voneinander unterscheiden.

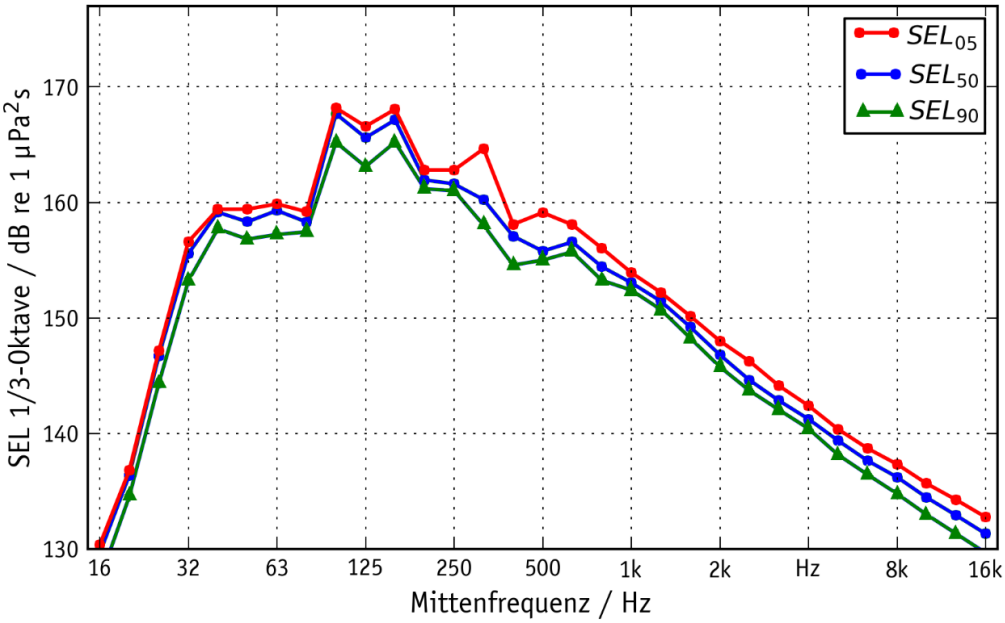


Abbildung 17: *1/3-Oktav-Spektrum des 5-, 50- und 90 %-Überschreitungspegels des Einzelereignispegels (L_E bzw. SEL) in ca. 750 m Entfernung während der Gründungsarbeiten eines Monopfahls im ungeminderten Impulsrammverfahren. Dabei charakterisiert der SEL_{90}-Pegel zumeist den Beginn eines Rammprozesses mit geringen Rammenergien inkl. Soft-Start, der SEL_{50}-Pegel den Rammprozess bis zur Hälfte inkl. ramp-up Prozedur der Rammenergie und der SEL_{05}-Pegel das Ende eines Rammprozesses mit maximaler Rammenergie.*

Rammhammer ./. Einzelereignispegel

Die wesentlichen Merkmale eines (Impuls-) Rammhammers sind (i) die Fallmasse, (ii) die zu erreichende Beschleunigung – und damit die zu erzielende Kraft – und (iii) das Design der Rammhaube (engl. anvil), d. h. die Krafteinleitung bzw. -übertragung vom Rammhammer in den Pfahlkopf. Für das Anheben und das Beschleunigen der Fallmasse ist zudem die hydraulische Ansteuerung mittels sogenannter Power-Packs entscheidend. Das Produkt von Fallmasse und Beschleunigung entspricht der

einwirkenden Kraft. Für die Einleitung der Rammenergie in den Pfahlkopf hat die Rammhaube einen entscheidenden Einfluss, da diese projektspezifisch an den Pfahldurchmesser und das Design des Pfahlkopfes angepasst werden muss.

Die Interaktion von Pfahlkopf und Rammhammer wurde zudem im F&E-Vorhaben BORA[4] intensiv untersucht (Chemlnizkij et al., 2016). So konnte mittels Modellierungen und Messungen am Pfahl gezeigt werden, dass das Design aus Fallmasse und Rammhaube einen entscheidenden Einfluss auf eine kraftschlüssige Kopplung zwischen Rammhammer und Pfahlkopf hat (Heitmann et al., 2015; Chemlnizkij et al., 2016). So ist nicht auszuschließen, dass bei einer nicht kraftschlüssigen Verbindung zwischen Rammhammer und Pfahlkopf erhebliche Verluste in der übertragenden Rammenergie entstehen können, die zumindest zum Teil als Schall abgestrahlt werden.

Bei Messungen der eingeleiteten Rammenergie am Pfahlkopf während des F&E-Vorhabens ESRa[10] konnte gezeigt werden, dass i. d. R. 90 bis 95 % der Rammenergie vom Rammhammer in den Pfahlkopf eingeleitet werden kann (Wilke et al., 2013).

Technische Anmerkung: Es ist aus akustischen Gründen empfehlenswert, einen möglichst großen Rammhammer mit einer großen bzw. schweren Fallmasse und verminderter Kapazität (50 bis 60 %), anstatt eines kleineren Rammhammers mit geringer Fallmasse mit 100 % Kapazität zur Erreichung derselben Rammenergie einzusetzen, siehe Kapitel 3.2. Der physikalisch-technische Hintergrund ist, dass durch die größere Fallmasse bei großen Rammhammern die Kontaktdauer zwischen Rammhammer und Pfahlkopf verlängert wird und somit theoretisch bei derselben Krafteinleitung in den Pfahlkopf die maximale Amplitude gemindert wird. Dies kann derzeit empirisch nicht valide nachgewiesen werden, da zumeist in keinem Bauvorhaben zwei unterschiedlich große Rammhammer an einem Pfahl eingesetzt wurden. Jedoch wurden in einem Bauvorhaben zwei unterschiedliche Baufirmen eingesetzt, die mit unterschiedlichen Rammhämmern dieselben Monopfahl-Strukturen installiert haben, so dass zumindest erste belastbare Hinweise vorliegen. Zudem lässt sich durch den Vergleich zwischen den einzelnen Bauvorhaben mit vergleichbarem Pfahl-Design und unterschiedlichen Rammhämmern ebenfalls ein Schallpegelunterschied von einigen Dezibel ableiten.

Generation bzw. Typ des Rammhammers ./. Einzelereignispegel

In den vergangenen Jahren zeigte sich, dass eine neuere Generation von Rammhämmern mit Rammenergien von > 2.500 kJ aufgrund der wachsenden Monopfahl-Durchmesser notwendig wurden. Derzeit sind Rammhämmer von zwei unterschiedlichen Herstellern mit Rammenergien zwischen 3.000 und 4.000 kJ am Markt verfügbar. In Abbildung 18 sind die zeitlichen Verläufe der in 750 m gemessenen Einzelereignispegel und der verwendeten Rammenergie aus drei unterschiedlichen Bauvorhaben mit

drei unterschiedlichen Rammhammertypen aus der Nordsee zusammengefasst. Dabei wurden ein kleiner Rammhammer (< 3,000 kJ) und zwei große Rammhämmer (≥ 3,000 kJ) eingesetzt.

Abbildung 18 zeigt einen prinzipiell vergleichbaren, zeitlichen Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels (SEL bzw. L_E) bei annähernd vergleichbaren Rammenergien. Im Rammverlauf nimmt die notwendige Rammenergie zumeist zu, was zu einem Pegelanstieg führt. Allerdings konnte mit zwei der drei eingesetzten Rammhämmer die eingesetzte Rammenergie innerhalb der Rammung nahezu stufenlos angepasst, d. h. erhöht oder verringert, werden. Bei dem dritten Rammhammer wurde die Rammenergie nur in diskreten Stufen angepasst, d. h. kein schalloptimiertes Rammverfahren angewendet.

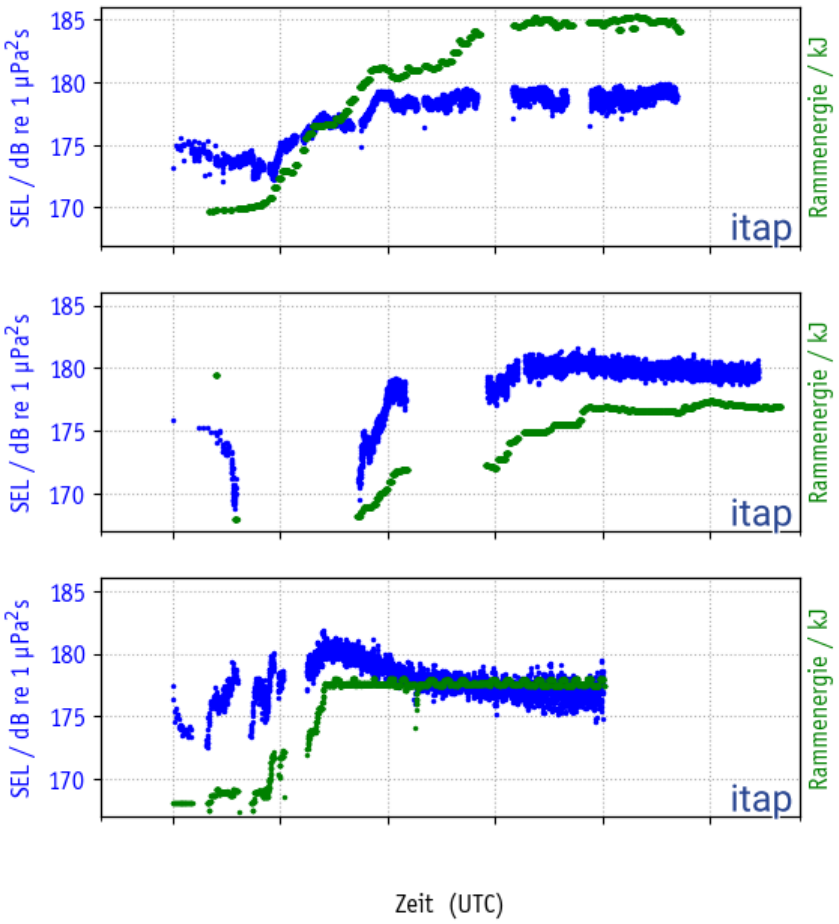


Abbildung 18: *Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels (SEL bzw. L_E, blau) und der verwendeten Rammenergie (grün) während Monopfahl-Installationen (Durchmesser 5,5 bis 7,5 m) in einer Entfernung von 750 m mit drei unterschiedlichen Rammhammertypen in der deutschen AWZ der Nordsee. Sämtliche Rammungen wurden ohne Schallschutzsysteme durchgeführt Oben: Pfahldurchmesser 7,5 m mit großem Rammhammer und Einsatz eines schalloptimierten Rammverfahrens (> 3,000 kJ), Mitte: Pfahldurchmesser 5,5 m mit kleinem Rammhammer der älteren Generation (≤ 3,000 kJ) und noch keinem ausgereiften, schalloptimierten Rammverfahren, unten: Pfahldurchmesser 6,5 m mit großem Rammhammer ohne schalloptimiertes Rammverfahren (≥ 3,000 kJ).*

In Abbildung 19 sind die Brutto-Rammdauern derselben Rammhämmer aus Abbildung 18 über je ein ausgewähltes Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Nordsee zusammengestellt. Dabei wurden Fundamentinstallationen mit Rammunterbrechungen von mehreren Stunden aufgrund von technischen Problemen vorsorglich aussortiert.

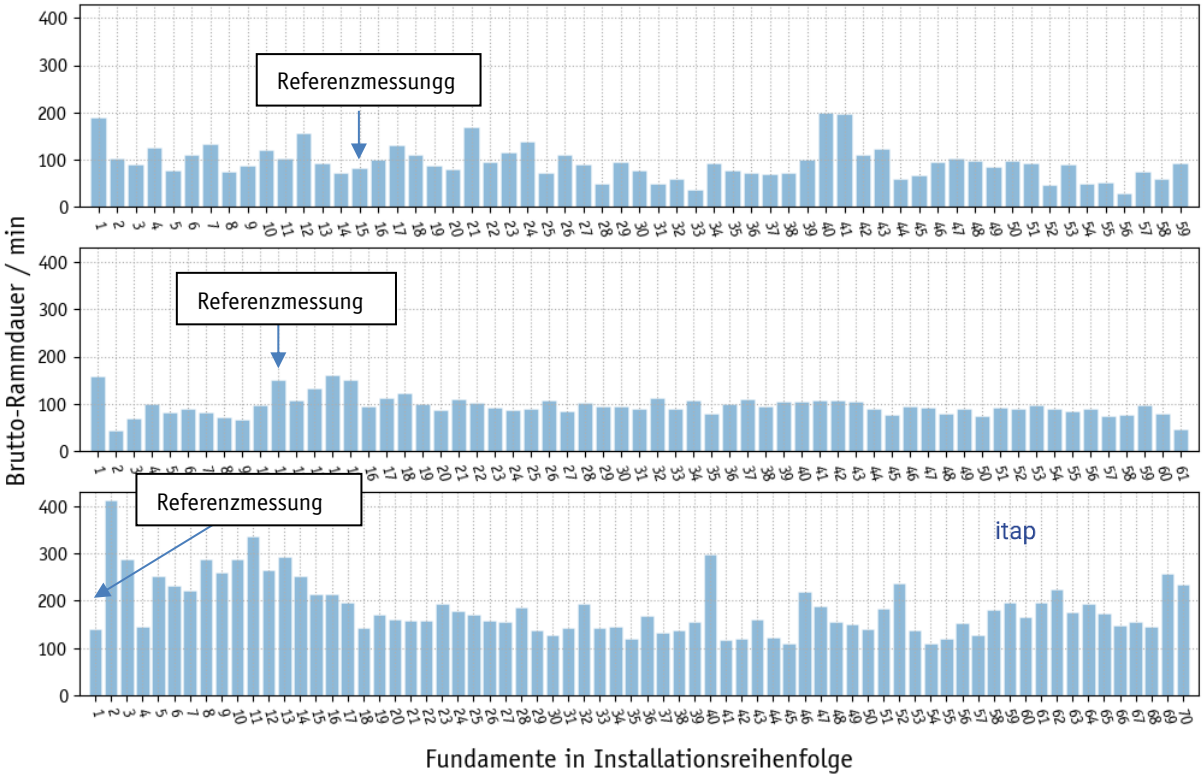


Abbildung 19: *Brutto-Rammdauer pro Monopfahl-Installation mit drei unterschiedlichen Rammhämmern, wie in Abbildung 18 beschrieben. Dabei wurde für jedes Bauvorhaben nur ein Monopfahl ohne Schallschutzmaßnahme (Referenzmessung) installiert.*

Die Brutto-Rammdauer[11] der Monopfahl-Installationen bei allen drei Bauvorhaben unterschied sich jedoch deutlich voneinander. Mit einem kleinen Rammhammer der älteren Generation (mittlere Graphik) und den ersten Anfängen eines schalloptimierten Rammverfahrens betrug die Brutto-Rammdauer zumeist 100 Min. pro Monopfahl und nur vereinzelt wurden Rammdauern von bis zu 180 Min. notwendig. Bei einem der großen Rammhammer der neueren Generation mit schalloptimiertem Rammverfahren (obere Graphik) variierte die Brutto-Rammdauer i. d. R. zwischen weniger als 60 und 150 m. Basierend auf den Rammbarkeitsstudien war bekannt, dass fünf Fundamentstandorte eine sehr komplexe Bodenschichtung mit zum Teil sehr hohen Bodenwiderständen aufwiesen, so dass eine längere

[11] Brutto-Rammdauer: Zeitspanne vom ersten bis zum letzten Rammschlag inkl. ggf. notwendiger Pausen für z. B. Neigungsmessungen.

Rammdauer zu erwarten war. Dieses Bauvorhaben befand sich im Gegensatz zu den beiden anderen Bauvorhaben auch in der AWZ der deutschen Ostsee. Bei der unteren Grafik in Abbildung 18 wurde ein großer Rammhammer ohne ein schalloptimiertes Rammverfahren eingesetzt. Die Brutto-Rammdauer variierte zumeist zwischen 120 und 210 Min., obwohl der Pfahldurchmesser geringer als in der Ostsee war. Vereinzelt traten auch Brutto-Rammdauern von > 240 Min. auf, die zumeist auf längere Rammunterbrechungen zwecks Neigungsmessungen am Monopfahl und geringen Schlagwiederholungsraten des eingesetzten Rammhammers zurückzuführen sind.

Abbildung 19 zeigt, dass sich die Brutto-Rammdauer erheblich unterscheiden kann. Insbesondere die Verwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens verkürzt die Brutto-Rammdauer erheblich und führt i. d. R. zu einer Einhaltung der geforderten Rammdauer von 180 Min. pro Monopfahl-Installation.

Abbildung 20 verdeutlicht anhand der eingesetzten max. Rammenergie den Einsatz eines schalloptimierten Rammverfahrens nochmals. Im oberen Bild wurde ein großer Rammhammer mit einem schalloptimierten Rammverfahren eingesetzt. Bei keiner einzigen Rammung eines Monopfahls wurden die Lärmschutzwerte überschritten, obwohl der größte Pfahldurchmesser aller drei Bauvorhaben verwendet wurde und sich dieses Bauvorhaben in der Ostsee mit einem sehr komplexen Boden befand. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Bodenbedingungen waren unterschiedlich hohe max. Rammenergien notwendig, um die Monopfähle auf Endtiefe zu bringen. Zudem wurde ein Unterwasserschall-Echtzeit-Messgerät zur Unterstützung des schalloptimierten Rammverfahrens dauerhaft in 750 m eingesetzt. In der mittleren Abbildung wurde ein kleiner Rammhammer der älteren Generation mit den ersten Anfängen eines schalloptimierten Rammverfahrens zum Einsatz gebracht. Auch hier ist erkenntlich, dass die eingesetzte Rammenergie standortabhängig erheblich variiert wurde. Allerdings war zu diesem Zeitpunkt noch kein Unterwasserschall-Echtzeit-Messgerät am Markt verfügbar. In der unteren Abbildung wurde ein großer Rammhammer ohne ein schalloptimiertes Rammverfahren zum Einsatz gebracht. Es wurde die nach Maßgabe des BSH maximale Rammenergie bei nahezu allen Monopfahlinstallationen automatisch zum Einsatz gebracht, obwohl ein Unterwasserschall-Echtzeit-Messgerät zur Verfügung stand. Bei drei Monopfählen wurde die angeordnete, maximale Rammenergie aufgrund unvorhersehbar hohen Bodenwiderständen kurzzeitig überschritten, um die Monopfähle auf Endtiefe zu bringen.

Ein weiterer wesentlicher, zeitlicher Faktor ist auch die Neigungsmessung in Lotrichtung – sogenannte Vertikalitätsmessungen – des zu rammenden Pfahls. Im Laufe der Jahre konnte von Rammunterbrechungen zur Neigungsmessung teilweise Abstand genommen werden, da durch geeignete Pfahlführungen, wie z. B. das Noise Mitigation Screen System (Kapitel 6.3.1) und / oder optische Messverfahren derartige Messungen während der kontinuierlichen Rammung durchgeführt werden konnten.

In Abbildung 21 sind die entsprechenden (Schmalband-) Frequenzspektren der drei OWP-Bauvorhaben aus Abbildung 18 und Abbildung 19 aus der dt. AWZ der Nordsee zusammengefasst. Dabei wurden in allen drei Bauvorhaben jeweils Monopfahl-Installationen ohne die Anwendung von Schallschutzmaßnahmen verwendet.

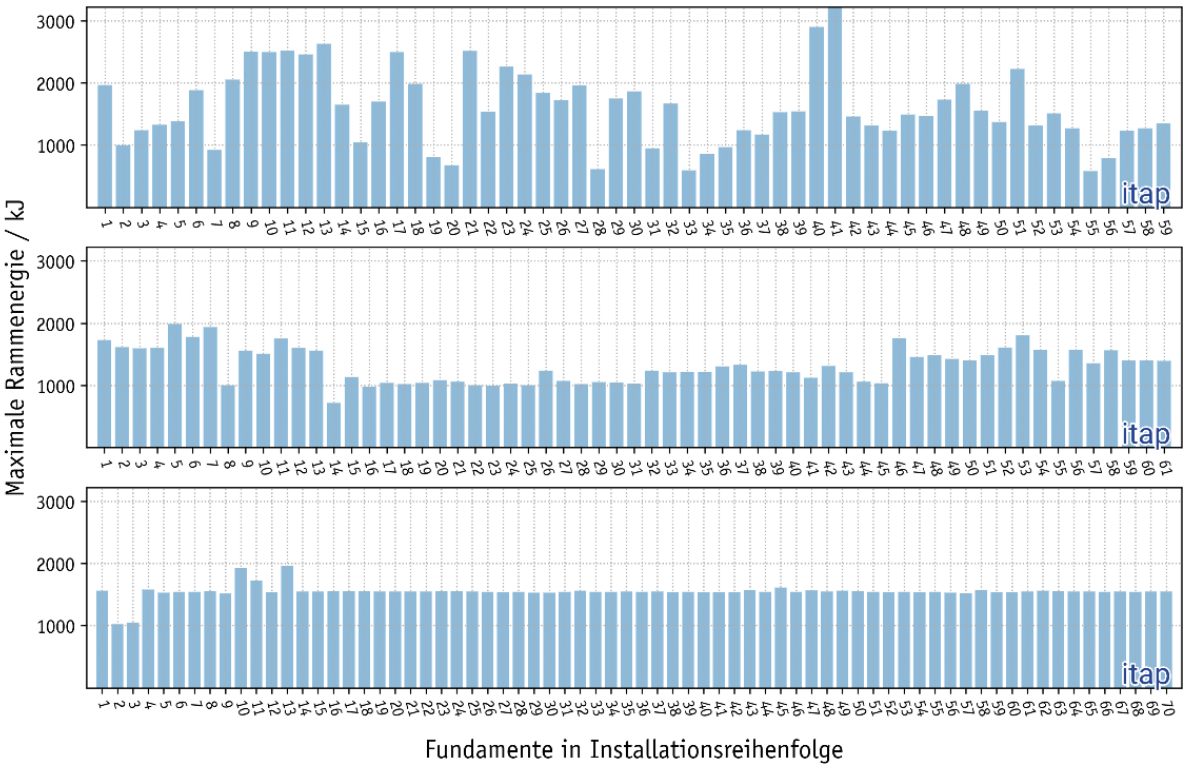


Abbildung 20: *Max. eingesetzte Rammenergie pro Monopfahl-Installation mit drei unterschiedlichen Rammhämmern, wie in Abbildung 17 beschrieben. Oben: großer Rammhammer der neuesten Generation mit einem schalloptimierten Rammverfahren, Mitte: kleiner Rammhammer mit einem noch nicht ausgereiften, schalloptimierten Rammverfahren, unten: großer Rammhammer der alten Generation ohne schalloptimiertes Rammverfahren (max. erlaubte Rammenergie seitens des BSH wurde dauerhaft verwendet).*

Technische Anmerkung: Eine typische Schlagwiederholungsfrequenz bei Rammhämmern beträgt laut Herstellerangaben i. d. R. um die 30 Schläge pro Minute bei 100 % Kapazität des eingesetzten Rammhammers (d. h. maximale Rammenergie). Bei neueren Generationen von Rammhämmern und vollständig überarbeiteten Hydraulikansteuerungen sind im schalloptimierten Rammverfahren Schlagwiederholungsfrequenzen von > 40 Schlägen pro Minute bei geringen Rammenergien bzw. Hammerkapazitäten (50 bis 60 %) möglich.

Der prinzipielle, spektrale Verlauf aller drei dargestellten Schmalbandspektren von Monopfahl-Installationen ist vergleichbar. Abweichungen existieren vor allem im Abfall des Rammschallpegels zu höheren Frequenzen (> 200 Hz) und im tieffrequenten Bereich zwischen 40 und 80 Hz. Der unterschiedliche Abfall der Schallpegelamplitude zu höheren Frequenzen hat zumeist keinen relevanten Einfluss auf den breitbandigen Gesamtpegel. Jedoch haben die Unterschiede unter 100 Hz sowohl für den ungeminderten, als auch für den geminderten Gesamtpegel erheblichen Einfluss. Je geringer der Schalleintrag ins Wasser ausfällt, umso geringer wird der Gesamtpegel ausfallen. Aufgrund der

Tatsache, dass diese Rammungen in drei unterschiedlichen OWP-Bauvorhaben mit drei unterschiedlichen Rammhämmern, unterschiedlichen Pfahl-Designs und unterschiedlichen standortspezifischen Rahmenbedingungen durchgeführt wurden, ist der genaue Einfluss jedes einzelnen Parameters statistisch nicht eindeutig zu benennen.

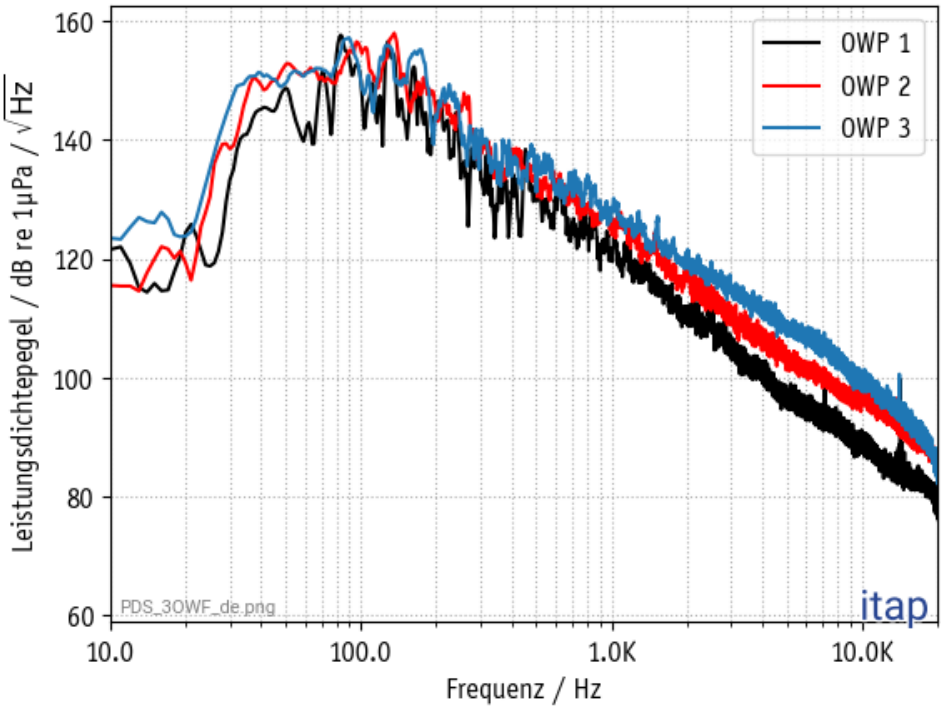


Abbildung 21: *Schmalbandspektren von Monopfahl-Installationen mit unterschiedlichen Rammhämmern, wie in Abbildung 18 beschrieben. Die Messdaten wurden hinsichtlich der verwendeten Rammenergie normalisiert und zudem wurde kein Schallschutzsystem verwendet.*

5.2.3 Rammmethode und Pfahllänge

Rammmethode ./. Einzelereignispegel

Grundsätzlich existieren zwei unterschiedliche (Impuls-) Rammmethoden:

(i) Rammungen oberhalb der Wasseroberfläche und

(ii) Unterwasser-Rammungen.

Bei Monopfählen arbeitet der Rammhammer i. d. R. immer oberhalb der Wasseroberfläche, d. h. die schallabstrahlende Mantelfläche des Pfahles in der Wassersäule bleibt während der gesamten Installation konstant (gesamte Wassersäule).

Bei Jacket-Konstruktionen existieren ebenfalls Pfähle, die durch die dafür vorgesehene Pfahlführung an der Jacket-Konstruktion immer oberhalb der Wasseroberfläche installiert werden, diese Pfähle nennt man i. d. R. Main-Piles; siehe Kapitel 5.2.1. Alternativ gibt es bei Jacket-Konstruktionen Pfahlführungen, die nur wenige Meter oberhalb des Meeresbodens enden. Der zu rammende Pfahl wird i. d. R. auch so weit in den Meeresboden eingeschlagen, dass dieser nur noch wenige Meter aus der Pfahlführung herausragt. Die schallemittierende Mantelfläche nimmt bei derartigen Installationen im Verlauf der Rammung stetig ab, d. h. der Rammhammer arbeitet zum Ende der Rammung unter Wasser (engl. submerged hammering). Derartige Pfahldesigns werden zumeist Skirt- oder Pin-Piles genannt.

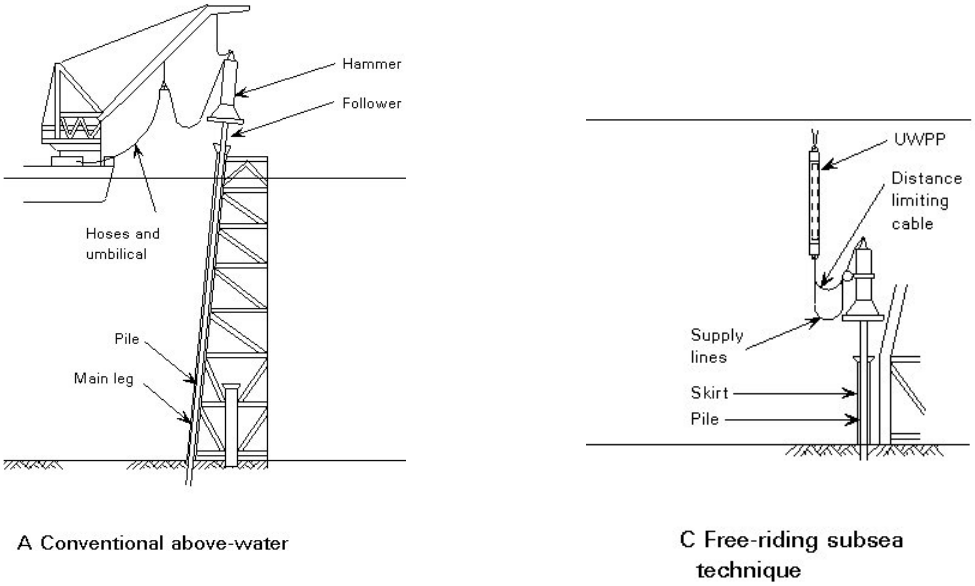


Abbildung 22: *Unterschied Main- (links) und Skirt-Piles (rechts) als Gründungspfähle für Jacket-Konstruktionen. (Quelle: ESDEP Lecture note [WG15A] fgg-web.fgg.uni-lj.si).*

In Abbildung 23 sind der gemessene Einzelereignispegel und die verwendete Rammenergie als Funktion der Rammdauer für einen Main-Pile (Monopfahl) und einen Skirt-Pile (Gründungspfahl einer Jacket-Fundamentstruktur mit Unterwasser-Rammung) gegenübergestellt.

Bei dem Monopfahl bzw. Main-Pile nimmt der Einzelereignispegel mit zunehmender Rammenergie zu. Im Falle eines Skirt-Piles nimmt der Einzelereignispegel zunächst mit der Rammenergie zu, fällt dann aber zum Ende der Rammung deutlich ab, obwohl sich die verwendete Rammenergie weiter erhöht bzw. konstant bleibt. Diese Abnahme korreliert mit der sich verringernden, schallabstrahlenden Mantelfläche des zu installierenden Pfahls. Mit dem Eintauchen des Rammhammers ins Wasser nimmt der Einzelereignispegel ab.

Bei Skirt-Piles kommt hinzu, dass diese Pfähle sowohl im Pre-, als auch im Post-Piling-Verfahren im Meeresboden verankert werden. D. h. die Pfähle können durch die vorhandenen Pfahlführungen (engl. pile-sleeve) der Jacket-Fundamentstruktur gerammt werden (engl. post-piling), aber auch die Verwendung von sogenannten Rammschablonen (engl. piling template) anstelle der Jacket-Fundamentstrukturen ist möglich (engl. pre-piling). Somit sind zum einen Ankopplungseffekte zwischen dem zu

rammenden Pfahl und den Rammschablonen bzw. Jackets nicht auszuschließen und zum anderen ist die Architektur jeder Rammschablone bzw. jedes Jackets individuell, so dass sich mögliche Ankopplungseffekte unterschiedlich in der jeweiligen Struktur ausbreiten können.

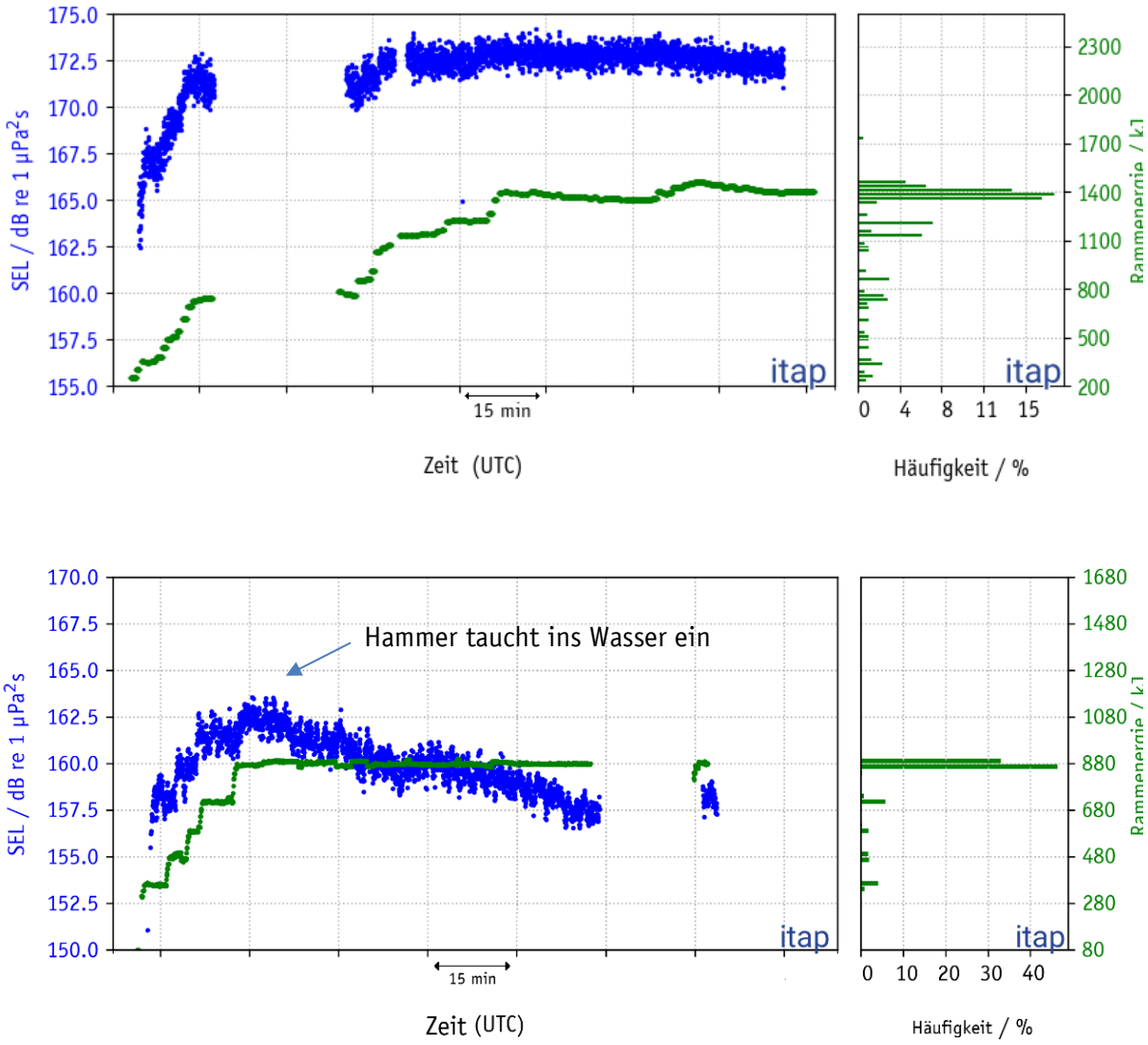


Abbildung 23: *Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels (L_E bzw. SEL) in 750 m Entfernung und der eingesetzten Rammenergie. Beide Rammungen wurden ohne Schallschutzsystem durchgeführt. Oben: Rammung eines Monopfahls bzw. Main-Piles (Rammungen immer oberhalb der Wasseroberfläche); unten: Rammung eines Skirt- bzw. Pin-Piles (Rammung startet oberhalb der Wasseroberfläche und endet unterhalb der Wasseroberfläche; Unterwasser-Rammungen).*

Eine detaillierte Analyse zum Einfluss von Ankopplungseffekten und Schwingeigenschaften der Fundamentstruktur im Pre- bzw. Post-Piling-Verfahren ist derzeit aufgrund der geringen empirischen Datenlage im MarinEARS[2] statistisch nicht valide möglich. Ein quantitativer Vergleich zwischen Installationen von Monopfählen und Main-Piles im Post-Piling-Verfahren zeigte, dass im Post-Piling-

Verfahren der Main-Piles bei vergleichbarem Pfahl-Design und verwendeter Rammenergie die gemessenen Schallpegelwerte um bis zu 2 dB lauter ausfallen können. Bei Verwendung von Rammschablonen (engl. pre-piling) hängt eine potenzielle Pegelerhöhung von der Architektur dieser Rammschablone ab.

Zudem werden bei der Rammung von sogenannten Pin- oder Skirt-Piles zumeist Pfahlverlängerungen (engl. follower) zwischen dem Pfahlkopf und der Rammhaube verwendet, damit es zu keinem unerwünschten Kontakt zwischen Rammhammer und Pfahlführung kommt. Aufgrund der bisherigen empirischen Datengrundlage wirkte sich der Follower wie eine Pfahlverlängerung, d. h. längere schallemittierende Mantelfläche, aus.

Pfahllänge ./. Einzelereignispegel

Basierend auf Abbildung 12 steigt i. d. R. die notwendige Rammenergie zur Erreichung der finalen Einbindetiefe mit dem Pfahldurchmesser an. Zudem steigt bei gleichem Pfahldurchmesser die notwendige Rammenergie mit der Einbindetiefe an; siehe Abbildung 15. Der Bodenwiderstand und die Einbindetiefe sind i. d. R. hochgradig miteinander korreliert. Somit stellt derzeit die Pfahllänge keinen linear unabhängigen Einflussparameter auf die Schallabstrahlung dar, sondern ist mit der verwendeten und notwendigen Rammenergie bei Anwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens hochgradig korreliert.

Bei Pin- bzw. Skirt-Piles gilt der Zusammenhang zwischen eingesetzter Rammenergie, Einbindetiefe und abgestrahltem Schall ebenfalls. Jedoch kommt die vorhandene, schallabstrahlende Mantelfläche hinzu. Ein wesentlicher Parameter ist somit die Länge des Pfahls unter Wasser. Dies hängt von den Parametern Wassertiefe, Einsatz eines Followers und maximaler Länge, die der Pfahl bei Erreichung der maximaler Einbindetiefe aus dem Meeresboden ragt (engl. stick-up length), ab; Abbildung 23.

Installationsschiff ./. Einzelereignispegel

In Deutschland wurden zudem bisher Hubplattformen (engl. jack-up vessel) und schwimmende Installationsschiffe (mit Verankerungen oder einem Dynamic Positioning System – DP) eingesetzt. Die Analyse über sämtliche Einträge in der bestehenden MarinEARS[2]-Datenbank konnte allerdings bisher keinen signifikanten Einfluss des gewählten Installationsschiffstypen auf die gemessenen Schalleinträge bei ungeminderten Impulsrammungen ins Wasser erkennen lassen.

Technische Anmerkung: Gleichwohl konnte vereinzelt eine abschirmende Wirkung von Hubplattform-Beinen zwischen Rammung und Messhydrophon im Bereich von mehreren Dezibel festgestellt werden. Es ist somit zu empfehlen, die Messsysteme für Unterwasserschall ohne Hindernisse zum zu rammenden Pfahl zu positionieren.

Technische Anmerkung: Bei schwimmenden Installationsschiffen kann es durchaus zu einer Reflexion des Rammschalls an der Schiffshülle kommen. Es ist jedoch in erster Näherung davon auszugehen, dass diese Reflexionen in ihrer Amplitude deutlich geringer ausfallen als der Direktschall, so dass ein Einfluss auf den Gesamtpegel in 750 m Entfernung unwahrscheinlich ist.

5.3 Zusammenfassung von Einflussfaktoren auf Rammschall

Die Entstehung und die Weiterleitung von impulshaltigem Unterwasserschall während der Installation von Fundamentstrukturen im Impulsrammverfahren ist zum einen von den standortspezifischen Eigenschaften und zum anderen von den technisch-konstruktiven Eigenschaften eines OWP-Bauvor-habens abhängig.

Bei den standortspezifischen Eigenschaften konnte ein Einfluss der nachfolgenden Parameter auf die Schallabstrahlung und die Weiterleitung anhand der projektübergreifenden Analyse des vorhandenen Fachinformationssystems MarinEARS[2] gezeigt werden:

- Bodenbeschaffenheit mit unterschiedlichen Bodenwiderständen und Schichtungen; insbesondere treten Bodenkopplungen in der dt. AWZ der Nordsee mit vorwiegend sandigen Böden auf, die i. d. R. um einen Faktor 10 (etwa 20 dB) geringer ausfallen als der direkt vom Pfahl ins Wasser eingetragene Unterwasserschall. Diese Bodenkopplungen können die erzielte Schallminderung von pfahlnahen, technischen Schallschutzsystemen beeinflussen; siehe Kapitel 6.4.2.3. Der Einfluss der Bodenkopplung bei anderen Bodenschichtungen, wie z. B. in der deutschen AWZ der Ostsee mit oberflächigen Sanden, gefolgt von Geschiebemergel und Kreide, kann derzeit anhand der Datenlage im MarinEARS[2]-Fachinformations-system nicht quantitativ abgeschätzt werden.
- Die Wassertiefe hat einen maßgeblichen Einfluss auf die spektrale Form des Rammschalls im Wasser. Je flacher das Gewässer, desto höher fällt die Grenzfrequenz aus, unter der ein Schalleintrag ins Wasser nicht bzw. nicht ohne weiteres möglich ist. Die Grenzfrequenz hängt dabei auch maßgeblich vom Bodenprofil und den damit verbundenen Bodenwiderständen ab. Die Wassertiefe hat somit einen Hochpass-Charakter im Flachwasserbereich.

- Im Flachwasserbereich der deutschen AWZ der Nordsee hat die Bathymetrie aufgrund ihres „ebenen" Charakters bisher noch keinen wesentlichen Einfluss auf die Schallabstrahlung genommen. Die Ostsee ist für ihre ausgeprägte Topographie, z. B. im Bereich *Kriegers Flak* oder *Adlergrund* bekannt. Hier wurde bisher jedoch der Einfluss der unterschiedlichen Wassertiefen bisher nicht messtechnisch untersucht. Umgebungsparameter, wie Strömung, Temperatur und Leitfähigkeit des Wassers, haben bisher ebenfalls keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss auf die Schallabstrahlung und Weiterleitung von Rammschall im Flachwasser aufgewiesen. Sogenannte Schallkanäle konnten in der deutschen AWZ der Ostsee messtechnisch erfasst werden, aber auch diese zeigten aufgrund ihrer räumlichen und zeitlichen Anordnung keinen Einfluss auf die Schallabstrahlung und -weiterleitung von impulshaltigem Rammschall.
- Statistisch können bei vergleichbaren Pfahl-Designs und Rammenergien die Schalleinträge in der deutschen Ostsee um bis zu 2 dB lauter ausfallen als bei vergleichbaren Nordseevorhaben. Der Grund ist vermutlich ein deutlich unterschiedlicher Bodenaufbau in der Nord- und Ostsee.
- Die Hydrophonhöhe hat in der unteren Wasserhälfte keinen Einfluss auf die Schallausbreitung von impulshaltigem Rammschall.
- Die sogenannte Ausbreitungsdämpfung nimmt bei der Schallübertragung über große Distanzen (> 10 km) aufgrund der frequenzabhängigen Schallabsorption im Flachwasser eine sehr wesentliche Rolle ein. Für eine erste, überschlägige Abschätzung der Ausbreitungsdämpfung ist im Flachwasser eine Annahme von $15*\log_{10}$ (Abstandsverhältnis) bis ca. 10 km akzeptabel. Für Ausbreitungsrechnungen über größere Distanzen sind frequenzabhängige, empirische oder semi-empirische Ansätze zwingend erforderlich.

Es zeigte sich allerdings auch, dass die o. g. Einflussfaktoren zumeist nicht linear unabhängig voneinander sind, so dass auf der vorliegenden, empirischen Datengrundlage keine eindeutige, quantitative Zuordnung der Einflussfaktoren auf den impulshaltigen Rammschall erfolgen konnte.

Der abgestrahlte Schallpegel während einer Impulsrammung (Rammschall) hängt zudem von vielen technisch-konstruktiven Einflussfaktoren, wie z. B. dem Pfahl-Design, der Rammenergie, dem Rammhammer, der Rammmethode bzw. -verfahren ab. Da jedoch alle genannten Parameter oftmals auch in Wechselwirkung zueinanderstehen, können z. T. keine quantitativen Aussagen über den Einfluss eines einzelnen Parameters anhand der vorliegenden, empirischen Datenlage getroffen werden. Einen der wesentlichsten Einflussparameter auf den Unterwasserschall hat die spektrale Zusammensetzung des Rammschalls und die Schallausbreitung über größere Entfernung. I. d. R. weist der ungeminderte Rammschall eine tieffrequente Charakteristik auf, die je nach Pfahldurchmesser ein Maximum zwischen 63 und 160 Hz aufweist. Zu höheren und tieferen Frequenzen fällt das Spektrum stetig ab.

Generell können folgende, qualitative Annahmen auf technisch-konstruktiver Seite für den impulshaltigen Rammschall im Flachwasser aufgestellt werden:

- Der Pfahldurchmesser hat einen wesentlichen Einfluss auf den ungeminderten Rammschall; je größer der Pfahl, desto lauter der Rammschall.
- Es existiert i. d. R. eine Abhängigkeit zwischen der Einbindetiefe bzw. dem Bodenwiderstand sowie der eingesetzten Rammenergie und dem dadurch resultierenden Rammschall. Je höher der Bodenwiderstand bzw. die Einbindetiefe, desto mehr Rammenergie ist nötig und desto lauter ist der Rammschall. Im statistischen Mittel steigt der Rammschall mit 2 bis 3 dB pro Verdopplung der eingesetzten Rammenergie an.
- Bei ähnlichem Pfahl-Design sind sogenannte Main-Piles bei der Verankerung von Jacket-Konstruktionen im Meeresboden im statistischen Mittel um 2 dB lauter als vergleichbare Monopfähle. Es ist zu vermuten, dass diese Pegelerhöhung durch Ankopplungseffekte zwischen dem zu rammenden Pfahl und der Rammschablone bzw. dem Jacket auftritt, die diese Pegelerhöhung verursachen.
- Bei Installationen von Pfählen, die zum Ende der Rammung nur wenige Meter über dem Meeresboden herausragen (Rammung und Wasser bei Pin- bzw. Skirt-Piles), nimmt i. d. R. mit Reduzierung der schallabstrahlenden Mantelfläche der Rammschall bei gleichbleibender Rammenergie signifikant ab.
- Eine Analyse der Daten aus Referenzmessungen (ohne den Einsatz von Schallminderungssystemen) mit unterschiedlichen Rammhämmern wurde bisher noch nicht durchgeführt. Qualitativ ist aus theoretischen Überlegungen und praktischen Erfahrungen zu empfehlen, einen großen Rammhammer mit großer Fallmasse bei geringer Rammenergie (50 bis 60 % seiner max. Kapazität) statt eines kleinen Rammhammers mit kleiner Fallmasse bei voller Kapazität zu verwenden (vergleichbare Rammenergien). Hintergrund ist der Einfluss der höheren Fallmasse auf die Kontaktzeit zwischen Rammhammer und Pfahlkopf. Es deutet sich ebenfalls an, dass die Verwendung eines großen Rammhammers der neueren Generation in Kombination mit einem schalloptimierten Rammverfahren ebenfalls einen Einfluss auf die spektrale Form und damit indirekt auf den Einzelereignispegel hat.
- Die Auswahl des Rammhammertyps und die Verwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens mit geringer Rammenergie und hoher Schlagwiederholungsfrequenz haben jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Rammdauer. So zeigt sich bei Verwendung von großen Rammhämmern mit einem schalloptimierten Rammverfahren in Kombination mit zeit-optimierten Neigungsmessungen am Pfahl in Lotrichtung, dass die Vorgabe von 180 Min. Gesamtrammdauer inkl. Vergrämungsmaßnahme auch bei Monopfahldurchmessern bis zu 8 m eingehalten werden.

6. Offshore-taugliche und marktreife Schallschutzsysteme

6.1 Einleitung und Historie

Deutschland definierte im Jahr 2008 zum Schutz von marinen Säugetieren vor einer temporären Hörschwellenverschiebung (engl. Temporal Threshold Shift – TTS) durch impulshaltigen Rammschall ins Wasser ein duales Lärmschutzwertkriterium, bestehend aus dem breitbandigen Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL) und dem Spitzenpegel ($L_{p,pk}$), Kapitel 3, auch wenn zu diesem Zeitpunkt noch kein offshore-taugliches Schallschutzsystem, das einen Stand der Technik aufweisen konnte, am Markt verfügbar war. Nach ersten Erfahrungen im Rahmen von Offshore-Forschungsprojekten ist seit 2011 der Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen während impulshaltiger, schallintensiver Bautätigkeiten innerhalb von OWP-Vorhaben verbindlich vorgeschrieben, Kapitel 3.

Im F&E-Vorhaben EsRa[10] wurden 2011 erstmalig fünf verschiedene Prototypen von technischen Schallschutzsystemen an einem vorinstallierten Testpfahl unter annähernd realistischen Offshore-Bedingungen in der deutschen Ostsee bei einer Wassertiefe von 8 m getestet (Wilke et al., 2012). Die erreichten, breitbandigen Schallminderungen sämtlicher getesteter Schallschutzsysteme im Prototypenstadium betrugen << 10 dB. Mögliche Einflussfaktoren für die geringen erzielten Schallminderungen könnten die sehr hohe Einbindetiefe von > 60 m des Testpfahls und dem Anwachseffekt geschuldet sein (Pfahlgründung vor > 10 Jahren). Basierend auf der Tatsache, dass zum einen Offshore-Windenergie ausgebaut werden sollte, es aber zum anderen keine technisch verlässlichen Maßnahmen zur Einhaltung der definierten Lärmschutzwerte in Deutschland gab, zeigte sich somit eine Notwendigkeit der Entwicklung von offshore-tauglichen und effektiven, technischen Schallschutzmaßnahmen, die im Serienbetrieb beim Bau von Fundamentstrukturen einsetzbar sein sollten.

Während des Baus des OWPs *Trianel Borkum West II* (Phase 1) in der deutschen AWZ der Nordsee (Bauzeit 2011 und 2012) wurde erstmalig ein Großer Blasenschleier versuchsweise als serielles Schallschutzsystem eingesetzt, d. h. der Einsatz des Großen Blasenschleiers sollte möglichst bei jeder Impulsrammung Anwendung finden. Der Bau der Fundamentkonstruktionen wurde durch ein F&E-Vorhaben hinsichtlich der Entwicklung eines seriell einsetzbaren und offshore-tauglichen Schallschutzsystems begleitet (Diederichs et al., 2014)[12].

Die Bundesrepublik Deutschland förderte bis 2014 insgesamt 18 F&E-Projekte im Bereich Schallschutz und Schallminderungsmaßnahmen mit einer Gesamtfördersumme von 27 M€ (Verfuß, 2014). Zudem wurde seitens der zukünftigen OWP-Betreiber und deren beteiligten Baufirmen zusätzlich Geld für die Entwicklung und die Weiterentwicklung von Schallschutzsystemen aufgewendet.

Generell kann man sämtliche Schallschutzmaßnahmen in zwei Kategorien unterteilen:

[12] Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. Schlussbericht, gefördert durch BMU und PTJ, FKZ 325309, www.hydroschall.de.

(i) primäre Schallschutzmaßnahmen und
(ii) sekundäre Schallschutzmaßnahmen.

6.2 Primäre Schallschutzmaßnahmen

Bei primären Schallschutzmaßnahmen geht es um die Verringerung oder die Vermeidung der Entstehung von impulshaltigem Schall während der Installation von Fundamentstrukturen. Dies kann durch zwei Arten geschehen: durch aktive Reduzierung der Quellstärke, z. B. durch die Reduzierung der eingesetzten Rammenergie, oder durch Verwendung alternativer, schallarmer Gründungsstrukturen bzw. -methoden, wobei bei den alternativen Gründungsstrukturen und -methoden durchaus kein impulshaltiger Schalleintrag ins Wasser nach der Definition der MSRL erfolgt.

Eine bereits in der Praxis bewährte, primäre Schallschutzmaßnahme ist das schalloptimierte Rammverfahren, welches bereits in Kapitel 5.2.2 dargestellt wurde. In Abbildung 26 wird die Effektivität eines schalloptimierten Rammverfahrens in Kombination mit einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem dargestellt.

Weitere primäre, technische Schallschutzmaßnahmen, die sich gerade in der Entwicklung und Erprobung befinden, werden in Kapitel 7.4.3 diskutiert.

6.3 Sekundäre Schallschutzmaßnahmen

Bei sekundären Schallschutzmaßnahmen wird der entstandene, impulshaltige Rammschall im Wasser weitestgehend mittels technischer Maßnahmen, sogenannten Schallschutzsysteme (engl. noise abatement system), gemindert bzw. reduziert.

Die Entwicklung der sekundären Schallschutzsysteme in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee kann dabei grob in drei Phasen unterteilt werden.

(1) Die ersten offshore-tauglichen Schallschutzsysteme beim Bau der ersten OWPs in Deutschland wurden in den Jahren 2008 bis 2013 entwickelt und, z. T. im Prototypenstadium, unter realen Offshore-Bedingungen getestet (Phase 1). Abbildung 24 zeigt, dass der Lärmschutzwert von 160 dB_{SEL} in 750 m Entfernung teilweise um bis zu 10 dB überschritten wurde.
(2) Zwischen 2013 und 2014 wurden die am Markt befindlichen, ersten Schallschutzsysteme, die sich im Prototypenstadium als offshore-tauglich herausstellten, zunehmend weiterentwickelt und hinsichtlich ihrer erzielten Schallminderung verbessert. Trotz eines Anstiegs der Pfahldurchmesser, und damit einhergehenden Pegelerhöhung der Quelle, betrug die Überschreitung

des Lärmschutzwertes für den Einzelereignispegel max. 6 dB. Das Kriterium für den Spitzenpegel wurde teilweise bereits eingehalten. Diese Phase kann im Allgemeinen als Phase 2 der Entwicklung von Schallschutzsystemen angesehen werden.

(3) Die Phase 3 der Entwicklung startet mit dem Bau der Fundamentstrukturen (Monopfähle) des OWPs *Butendiek* (Bauzeit OWEA-Fundamente 2014), bei dem erstmalig eine Kombination aus zwei unabhängigen, sekundären, technischen Schallschutzsystemen eingesetzt wurde, und dem dualen Lärmschutzwertkriterium, bestehend aus Einzelereignispegel und Spitzenpegel, das erstmalig bei den Gründungsarbeiten von Monopfählen mit einem Pfahldurchmesser von bis zu 6,5 m eingehalten werden konnte. Hintergrund war, dass der OWP *Butendiek* sich mitten im FFH-Schutzgebiet „Sylter Außenriff" befindet und somit ein besonderes Augenmerk auf den naturverträglichen Bau gelegt wurde. In den Folgejahren stieg der Pfahldurchmesser bis auf 8 m im Jahr 2018/9 an, trotzdem wurde das duale Lärmschutzwertkriterium weitergehend eingehalten; Abbildung 24. Insbesondere in 2018 und 2019 zeigte sich, dass durch die Kombination aus zwei unabhängigen Schallschutzsystemen in Verbindung mit einem schalloptimierten Rammverfahren und der Verwendung eines Unterwasserschall-Echtzeit-Monitorings die Balance zwischen Einhaltung der Lärmschutzwerte und die zeitlichen Vorgaben hinsichtlich der Gesamtrammdauer optimiert werden konnten, so dass beide Maßgaben dauerhaft eingehalten werden konnten.

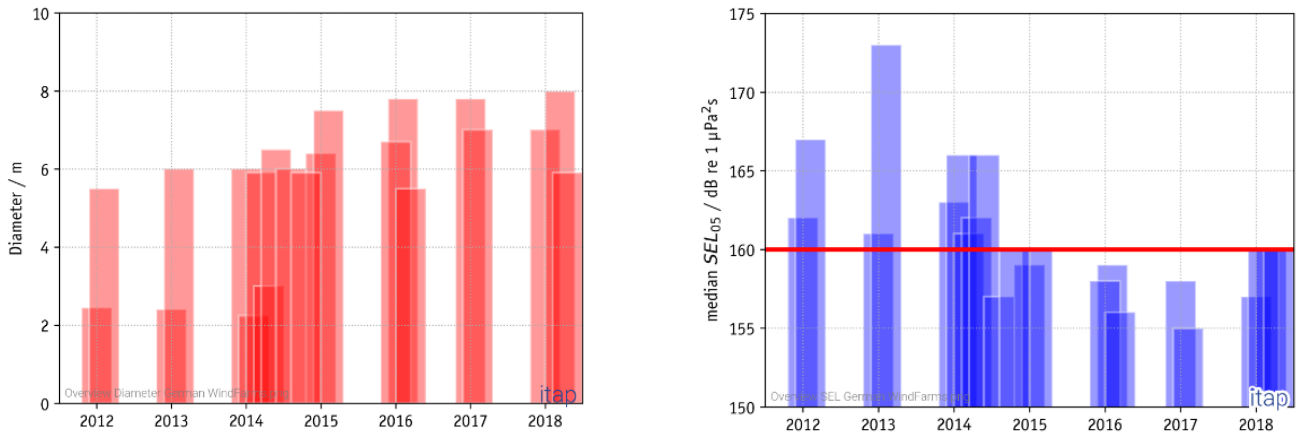


Abbildung 24: *Links: Entwicklung der Pfahldurchmesser für Fundamentstrukturen beim Bau von OWPs in der dt. AWZ der Nord- und Ostsee. Rechts: Gemessener Einzelereignispegel (SEL_{05}) in einer Entfernung von 750 m bei der Anwendung von technischen Schallschutzmaßnahmen; die rote Line markiert den verbindlichen Lärmschutzwert von 160 dB_{SEL}.*

Diese Entwicklung basierte auf der stetigen Weiterentwicklung (auch ohne öffentliche Fördergelder) der am Markt verfügbaren Schallschutzsysteme. Basierend auf dem dualen Lärmschutzwertkriterium in einer Entfernung von 750 m konzentrierte sich die (Weiter-) Entwicklung von Schallschutzsystemen

und -maßnahmen in den Jahren bis 2019 auf die breitbandige Reduzierung des Rammschalls. Die spektrale Wirksamkeit von Schallschutzsystemen wird in Kapitel 7.1 diskutiert.

Abbildung 25 zeigt den gemessenen Einzelereignispegel (Überschreitungspegel SEL_{05}) in 750 m Entfernung für alle Fundamentinstallationen des OWP-Bauvorhabens *Butendiek* in der Nordsee (Baujahr 2014). Die Rammungen wurden zunächst mit nur einem sekundären Schallschutzsystem ausgeführt. Aufgrund der dauerhaften Überschreitung der Lärmschutzwerte zu Beginn des Bauvorhabens wurde ein zweites sekundäres Schallschutzsystem eingesetzt. Mithilfe der Kombination aus zwei unabhängigen, sekundären Schallschutzsystemen ohne technische Probleme wurden die Lärmschutzwerte verlässlich eingehalten.

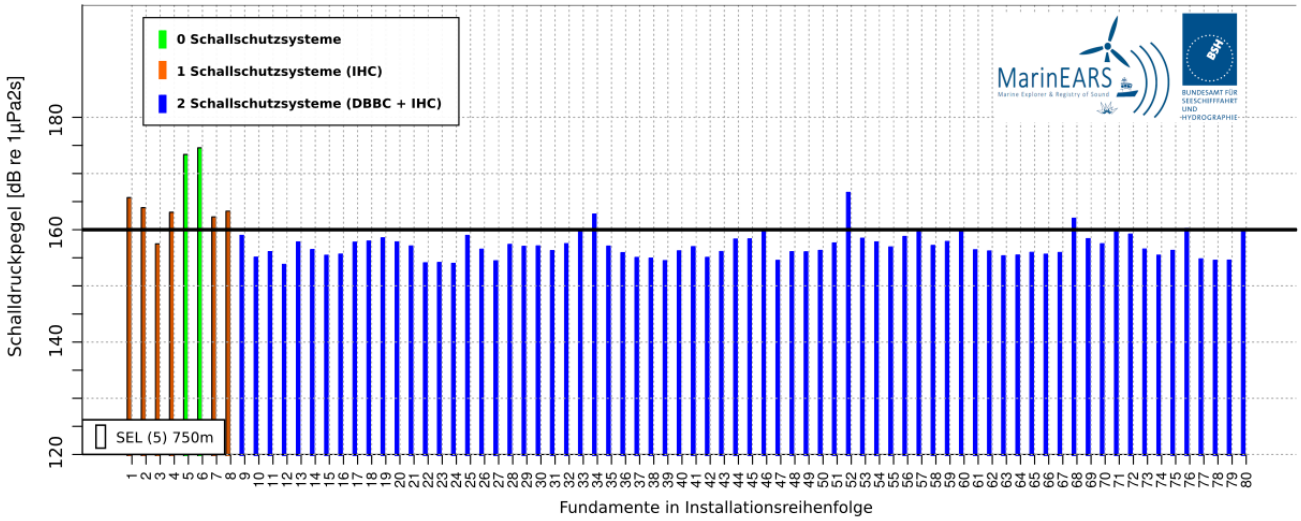


Abbildung 25: *Gemessener Einzelereignispegel bzw. Überschreitungspegel (SEL_{05}) in 750 m Entfernung zum jeweiligen Monopfahl für alle Fundamentinstallationen des OWPs Butendiek in der Nordsee mit und ohne Schallschutz. Für dieses Projekt wurden Messungen in mehreren Raumrichtungen und Hydrophonhöhen durchgeführt; für diese Darstellung wurden jeweils nur die höchsten Messwerte in 750 m dargestellt. Dieses Bauvorhaben hat erstmalig zwei unabhängige Schallschutzsysteme (pfahlnahes und pfahlfernes) kombiniert zum Einsatz gebracht und die lärmschutzwerte nach anfänglichen Optimierungen verlässlich eingehalten. (Quelle: MarinEARS Datenbank des BSH).*

In Abbildung 26 ist ein Beispiel eines späteren OWP-Bauvorhabens aus der AWZ der deutschen Nordsee dargestellt, bei dem eine Kombination aus einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem und der Anwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens mithilfe eines Echtzeit-Unterwasserschall-Monitorings als aktive Rückkopplung zwischen gemessenem Rammschall in 750 m und angewendeter Rammenergie eingesetzt wurde. Nicht dargestellt sind die ersten Fundamentstandorte, bei denen umfängliche Test- und Referenzmessungen in Anlehnung an die DIN SPEC 45653 (2017) und die BSH-Richtlinie (2013), d. h. Rammungen mit noch nicht optimierten Schallschutzsystemen und gänzlich ohne Schallschutzmaßnahmen, durchgeführt wurden.

Technische Anmerkung: Beim Bau des OWPs *Butendiek* wurden seitens des BSH umfängliche Zusatzmessungen zu den Anforderungen aus der Messvorschrift (BSH, 2011) gefordert. So wurden zwecks Überwachung bis zu vier Messpositionen in unterschiedlichen Richtungen zum Fundament (Monopfahl) und an einer Messposition bis zu drei unterschiedliche Hydrophone (2, 5 und 10 m über Grund) angeordnet. Somit liegen teilweise bis zu sieben prozessierte und qualitätsgesicherte Datensätze pro Monopfahl vor. Basierend auf dem Vorsorgeprinzip sind in Abbildung 25 jeweils nur die höchsten Messwerte pro Monopfahl unabhängig von der Raumrichtung und der Hydrophonhöhe dargestellt.

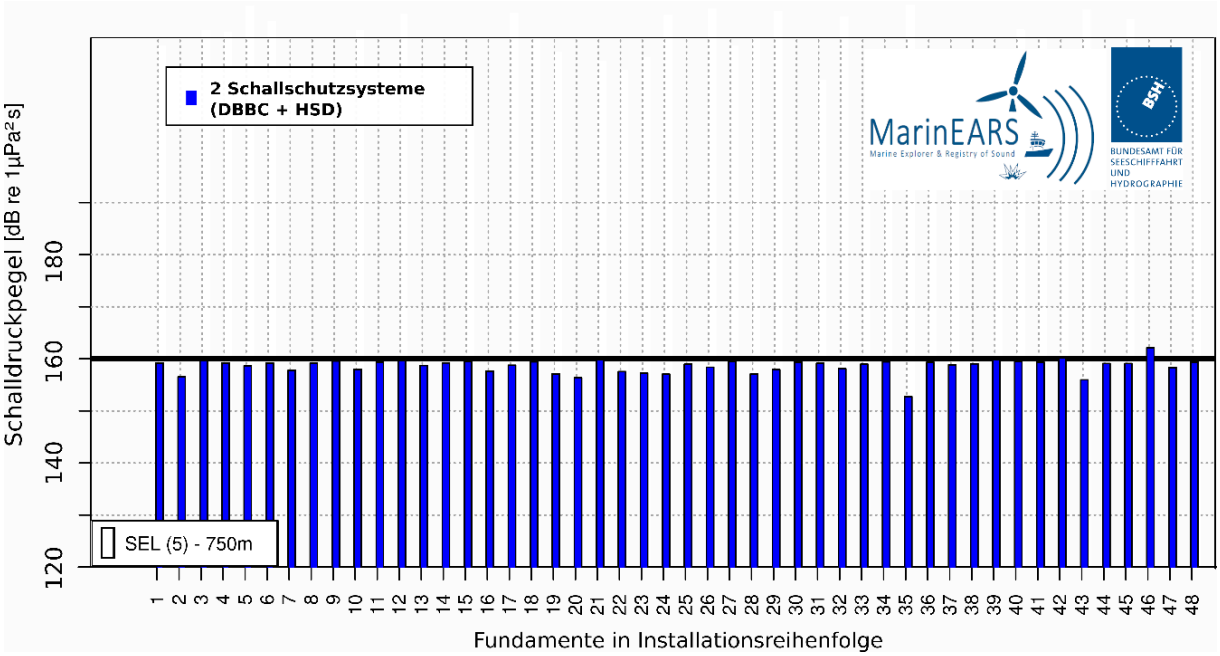


Abbildung 26: *Gemessener Einzelereignispegel bzw. Überschreitungspegel (SEL_{05}) in 750 m Entfernung zum jeweiligen Monopfahl für alle Fundamentinstallationen eines späteren OWP-Bauvorhabens in der Nordsee mit einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem und der Anwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens mithilfe eines Echtzeit-Unterwasserschall-Monitorings als aktive Rückkopplung zwischen gemessenem Rammschall in 750 m und Führung des Hammers. Nicht dargestellt sind die ersten Fundamentstandorte, bei denen umfängliche Test- und Referenzmessungen, d. h. Rammungen mit noch nicht optimierten Schallschutzsystemen und gänzlich ohne Schallschutzmaßnahmen, durchgeführt wurden.*

Es zeigt sich, dass die aktive Rückkopplung von den gemessenen Schallpegelwerten in 750 m in Echtzeit zum Rammhammerführer ein effektives Mittel für ein zeiteffizientes und schalloptimiertes Rammverfahren sein kann. Basierend auf der fortwährenden Einhaltung der Lärmschutzwerte wurde eine Aufhebung der maximal einzusetzenden Rammenergie beim BSH erwirkt, so dass der Rammhammer

innerhalb seiner technischen Möglichkeiten vollends eingesetzt werden konnte. So wurde im vorliegenden Fall die eingesetzte Rammenergie soweit während des Rammprozesses erhöht, so dass die Lärmschutzwerte in 750 m nicht überschritten wurden, aber der Rammprozess aufgrund der „hohen", eingesetzten Rammenergie deutlich unterhalb der geforderten Rammdauer von 180 Min. absolviert werden konnte.

Im Nachfolgenden wird ein genereller Überblick über die bestehenden und in der deutschen AWZ getesteten, sekundären Schallschutzsysteme gegeben. Im Fokus stehen die sekundären Schallschutzsysteme, die sich mindestens in einem deutschen OWP-Bauvorhaben im Serieneinsatz bewährt haben. Weitere Entwicklungen von sekundären Schallschutzsystemen, die bisher in deutschen Gewässern nicht im Serieneinsatz waren, werden in Kapitel 7.4.1 diskutiert.

> *Technische Anmerkung:* Basierend auf den Erfahrungen mit der Anwendung eines Großen Blasenschleiers in den Jahren 2015 bis 2019 hat sich die Dokumentation hinsichtlich des Einsatzes dieses Schallschutzsystems erheblich weiterentwickelt (BBC-Protokoll). Anhand der BBC-Protokolle kann nach heutigem Kenntnisstand der Einsatz sämtlicher Kompressoren und die daraus abzuleitende Gesamtluftmenge berechnet und ggfs. Rückschlüsse auf eventuelle technische Schwierigkeiten beim Einsatz des Großen Blasenschleiers abgeleitet werden. Diese detaillierte Protokollierung war beim Offshore-Bauvorhaben Butendiek im Jahr 2014 noch nicht vorhanden, so dass vereinzelte Überschreitungen des 160 dB_{SEL}-Wertes in Abbildung 25 und ggfs. auch in Abbildung 26 durchaus auf eine richtungsabhängige Schallminderung des eingesetzten Großen Blasenschleiers zurückzuführen sein könnten.
>
> *Technische Anmerkung:* Es hat sich bei sämtlichen deutschen Bauvorhaben in Deutschland gezeigt, dass bei Einhaltung des 160 dB Lärmschutzwertes durch den 5 %-Überschreitungspegel des Einzelereignispegels (SEL_{05}) in 750 m Entfernung auch der Lärmschutzwert von 190 dB durch den Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) eingehalten wurde.

Die zwischen 2011 bis 2019 getesteten, sekundären, technischen Schallschutzsysteme unterscheiden sich in ihrer Anwendung grob in:

(i) theoretischen Modellierungen,

(ii) Laborstudien mit kleinmaßstäblichen Versuchen,

(iii) Anwendungen im Nearshore-Bereich, z. B. im Hafenbau mit sehr geringen Wassertiefen und

(iv) großmaßstäblichen Anwendungen im Offshore-Bereich. Im Offshore-Bereich kann nochmals zwischen Testanwendungen an vereinzelten Fundamentstandorten im Rahmen von F&E-Vorhaben (Einsatz von Prototypen) und Einsätzen in realen OWP-Bauvorhaben als serienmäßiges Schallminderungssystem unterschieden werden.

Ein genereller Überblick über sekundäre, technische Schallschutzsysteme und mögliche alternative, schallarme Gründungsstrukturen und -verfahren wurde im Auftrag des Bundesamts für Naturschutz (BfN) erstmalig 2011 veröffentlicht (Koschinski & Lüdemann, 2011). In den Folgejahren wurde diese Studie zweimalig aktualisiert (Koschinski & Lüdemann, 2013 & 2019). In Verfuss et al. (2019) wird ebenfalls ein genereller Überblick über technische Schallschutzsysteme im Auftrag der Scottish Natural Heritage durchgeführt. In dieser Studie wurde mittels Fragebögen die Effektivität jedes einzelnen Schallschutzsystems und die zu erwartenden Kosten bei der Anwendung erhoben. Die nachfolgende Liste enthält einen Auszug aus der Literatur hinsichtlich entwickelter sekundärer Schallschutzsysteme (Prototypen und Systeme im Serienbetrieb), die in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee bis 2019 eingesetzt wurden (Koschinski & Lüdemann, 2011, 2013 & 2019).

> *Technische Anmerkung:* Im Rahmen eines Schallschutz-Workshops 2012 in Berlin konnten einige Schallschutzhersteller ihre Prototypen und Erfahrungen aus Modellierungen hinsichtlich zu erreichender Schallminderung mit ihren Systemen darstellen. Im Nachgang wurden die meisten dieser Systeme unter Offshore-Bedingungen eingesetzt und getestet. Es stellte sich heraus, dass die durch Modellierungen und kleinmaßstäbliche Experimente zu erwartenden Schallminderungen unter realen Offshore-Bedingungen nicht annähernd erreicht werden konnten. Basierend auf diesen Erfahrungen entschied das BSH, dass neue bzw. weiterentwickelte Schallschutzmaßnahmen, insbesondere sekundäre Schallschutzsysteme, ihre potenzielle Schallminderung zuerst großmaßstäblich bei einer tatsächlichen Fundamentinstallation unter realen Offshore-Bedingungen unter Beweis stellen müssen, bevor diese serienmäßig in Deutschland eingesetzt werden dürfen.

In Deutschland wurden bisher zumeist Monopfähle als Fundamentstrukturen von OWEAs eingesetzt. Lediglich in den ersten Jahren der Entwicklung wurden in zwei OWPs Jacket-Konstruktionen und in einem OWP eine Tripod-Struktur, sowie in zwei OWPs sogenannte Tripile-Strukturen für OWEAs verwendet. Umspannstationen und Konverter-Plattformen wurden i. d. R. aufgrund ihrer Größe und Massen auf Jacket-Strukturen inkl. Main- und / oder Skirt-Piles im Meeresboden verankert. Somit wurden die meisten Schallschutzsysteme beim Bau von Monopfahl-Strukturen eingesetzt, getestet und weiterentwickelt.

Tabelle 2: *Übersicht von sekundären, technischen Schallschutzsystemen, die bis 2019 in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee zum Einsatz kamen (Auszug aus Koschinski & Lüdemann 2011, 2013 & 2019). Die drei bewährten und offshore-tauglichen Schallschutzsysteme, die in Deutschland beim Bau von OWPs serienmäßig zum Einsatz kommen, sind markiert.*

Sekundäres, technisches Schallschutzsystem	**Ausführung**	**Kommentar**
Großer Blasenschleier (engl. Big Bubble Curtain – BBC)	In einfacher, zweifacher, dreifacher und vierfacher Ausführung, derzeit von zwei Lieferanten am Markt in Europa erhältlich.	Prinzip: Lufteintrag ins Wasser; pfahlfernes Schallschutzsystem. Anwendung: Jacket-Konstruktionen, Monopfähle, Tripods, Tripiles, Sprengung von Kampfmittelaltlasten.
Kleiner Blasenschleier	In geführter und ungeführter Ausführung hinsichtlich Verdriftung der Luftblasen im Wasser. Unterschiedliche Ausführungen von unterschiedlichen Herstellern wurden getestet.	Prinzip: Lufteintrag ins Wasser; pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: Monopfähle, Jacket, Tripod.
Noise Mitigation Screen (IHC-NMS)	Unterschiedliche Ausführungen hinsichtlich Pfahldurchmesser und Wassertiefe.	Prinzip: Rohr-in-Rohr-System; pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: Monopfähle.
Fire-Hose-System	Prototyp im F&E-Vorhaben ESRa.	Prinzip: Kombination aus Rohr-in-Rohr-System und kleinem Blasenschleier; pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: Monopfahl.
Kofferdamm	Unterschiedliche Ausführungen hinsichtlich Pfahldurchmesser und Wassertiefe.	Prinzip: Rohr-in-Rohr System, pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: Jacket-Konstruktion.
BEKA-Schale	Prototyp im F&E-Vorhaben ESRa.	Prinzip: Rohr-in-Rohr System, pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: Monopfähle.
Hydroschall-Dämpfer (HSD)	Unterschiedliche Ausführungen hinsichtlich Pfahldurchmesser und Wassertiefe.	Prinzip: Resonator; pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: Monopfähle, Pin-Pile-Installation (engl. pre-piling).
AdBm-System	Unterschiedliche Ausführungen hinsichtlich Pfahldurchmesser und Wassertiefe.	Prinzip: Resonator; pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: kleinmaßstäblicher Versuch.
Grout Annulus Bubble Curtain (GABC)	Unterschiedliche Ausführungen bei Jacket-Konstruktionen.	Prinzip: Lufteintrag zwischen Pfahlführung und zu rammendem Pfahl; pfahlnahes Schallschutzsystem. Anwendung: Jacket-Konstruktionen.

Für Monopfahl-Installationen haben sich als sekundäre Schallschutzsysteme im Serieneinsatz lediglich

- das Noise Mitigation Screen (NMS),
- der Hydro Sound Damper (HSD) und
- der Große Blasenschleier in einfacher und doppelter Auslegung (BBC und DBBC)

bis 2019 bewährt.

Für diese drei bisher bewährten, sekundären, technischen Schallschutzsysteme befinden sich im Anhang 1 ebenfalls technische Kurzberichte inkl. der zu erwartenden Schallminderung.

Bei den Installationen von Jacket-Fundamenten haben sich bis 2019

- der Große Blasenschleier in einfacher und doppelter Auslegung und
- der Grout Annulus Bubble Curtain (GABC)

im Serieneinsatz bewährt.

Sämtliche o. g. sekundären Schallschutzsysteme werden im nachfolgenden detailliert beschrieben und diskutiert.

6.3.1 Noise Mitigation Screen (NMS)

Das IHC-Noise Mitigation Screen (IHC-NMS), siehe Abbildung 27, wurde von der Fa. *IHC IQIP bv* entwickelt und gebaut. Es besteht aus einem doppelwandigen Stahlrohr, wobei der Zwischenraum mit Luft gefüllt ist. Die Schallminderung wird durch die Impedanzsprünge an den doppelwandigen Stahlrohren des IHC-NMS bewirkt.

Das IHC-NMS ist ein pfahlnahes Schallschutzsystem und wurde bisher bei Wassertiefen von bis zu 40 m und Pfahldurchmessern von bis zu 8 m (Monopfähle) zum Einsatz gebracht. Das IHC-NMS ist als einziges unter den Schallschutzsystemen ein multifunktionales System, das zum einen gleichzeitig als Pfahlführungssystem für die Einbringung der Monopfähle bis auf die Eindringtiefe dient. Auf der anderen Seite besitzt das IHC-NMS Sensoren und Technik für das Zentrieren der Pfähle und für die Durchführung von Neigungsmessungen in Lotrichtung.

Als zusätzliche, schallmindernde Maßnahme befindet sich im Zwischenspalt zwischen Innenrohr und zu rammendem Pfahl ein kleiner Blasenschleier, d. h. der Zwischenraum kann mit einem Luft-Wasser-Gemisch gefüllt werden. Die dafür notwendige komprimierte Luft wird zumeist vom Installationsschiff oder von einem externen Kompressor an Deck des Installationsschiffes zur Verfügung gestellt. Diese zusätzliche Maßnahme dient vorwiegend dazu, eventuelle störende Interaktionen (Schwingungskopplungen) zwischen dem IHC-NMS, dem zu rammenden Pfahl und dem Meeresboden bzw. Kolkschutz zu minimieren.

Der zu rammende Pfahl wird dann in dieses doppelwandige Rohr eingefädelt und schließlich mittels Impulsrammverfahren im Meeresboden verankert. Das IHC-NMS umschließt den zu rammenden Pfahl entlang der gesamten Wassersäule. I. d. R. endet die Monopfahl-Installation oberhalb des IHC-NMS-Systems, so dass der verwendete Rammhammer nicht in Kontakt mit dem Schallschutzsystem kommt.

Abbildung 27: *Noise Mitigation Screen der Fa. IHC IQIP bv. Links oben: technische Konstruktionszeichnung des doppelwandigen Stahlrohres inkl. innenliegender Pfahlführung; rechts oben: IHC-NMS im Offshore-Einsatz (Nahaufnahme); unten: IHC-NMS im Offshore-Einsatz. (Quelle: IHC IQIP bv)*

Je nach Größe des zu rammenden Pfahls und der zu erwartenden Wassertiefe ist das doppelwandige Rohr in seiner Länge und in seinem Durchmesser anzupassen. Zumeist wird die Bezeichnung das Noise Mitigation Screen mit einer vierstelligen Zahl versehen, die den maximalen Durchmesser des zu rammenden Pfahls kennzeichnen. Bsp.: IHC-NMS8000 ist für Pfahldurchmesser bis 8.000 mm ausgelegt.

Bei der Anwendung dieses pfahlnahen Schallschutzsystems mit mehreren hundert Anwendungen innerhalb von neun deutschen OWP-Bauvorhaben wurde bisher nur zu Beginn der Entwicklung einmalig ein technisches Problem festgestellt. Ansonsten zeigte sich bei sämtlichen weiteren Anwendungen, dass dieses Schallschutzsystem offshore-tauglich, fehlerfrei und robust zum Einsatz gebracht werden konnte.

Das IHC-NMS wurde bisher von Hubplattformen und schwimmenden Installationsschiffen in der Nordsee zum Einsatz gebracht.

Die erzielte Schallminderung mit dem IHC-NMS zeigte sich dabei unabhängig von

- der Wassertiefe (bis 40 m),
- der vorherrschenden Strömung (derzeitiger Einsatz $\leq$ 0.75 m/s) und
- der Raumrichtung (omnidirektionale Schallminderung).

Bei der Anwendung unter Offshore-Bedingungen stellten sich nachfolgende Vorteile des IHC-NMS heraus:

- kompaktes System, welches voll in das Installationsverfahren integriert ist; verfügt über multiple Funktionalitäten für die effektive und effiziente Einbringung von Monopfählen (Pfahlführung, Messungen der Neigung des zu rammenden Pfahls in Lotrichtung),
- ein Nachweis der Funktionalität mittels Offshore Tests vor Beginn der Installation ist nicht erforderlich,
- durch verlässliche Schallminderung in tiefen wie auch in höheren Frequenzbereichen zeigt sich eine hohe biologische Relevanz für die Schlüsselart Schweinswal,
- bei der Installation von Monopfählen mit Durchmessern bis zu 6 m kann die erzielte Schallminderung ausreichen, um die Lärmschutzwerte einzuhalten,
- gut einsetzbar in Wassertiefen bis 40 m

Allerdings zeigen die Erfahrungen aus den bisherigen neun OWP-Bauvorhaben auch die nachfolgenden Einschränkungen:

- Die Handhabung ist aufgrund der Größe und der Masse (mehrere 100 Tonnen) unter Offshore-Bedingungen komplex.
- Bei der Installation von Monopfählen mit Durchmessern > 6 m und Wassertiefen > 25 m ist die komplementäre Anwendung eines Blasenschleiersystems erforderlich, um die Lärmschutzwerte einzuhalten.
- Bodenkopplungen können grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden; siehe Kapitel 5.1.2.
- Die Gesamtlänge des IHC-NMS ist nicht ohne Weiteres innerhalb eines Bauvorhabens variabel, so dass eine Anwendung in Bauvorhaben mit stark unterschiedlichen Wassertiefen bisher noch nicht erfolgte.

6.3.2 Hydroschall-Dämpfer (engl. Hydro Sound Damper – HSD)

Der Hydroschall-Dämpfer (engl. Hydro Sound Damper - HSD) wurde von der *OffNoise Solutions GmbH* entwickelt und ist ein weiteres, pfahlnahes Schallschutzsystem. Das HSD-System besteht aus einer Absenk- und Hebevorrichtung (Seilvorrichtung mit Winden), einem (Fischer-) Netz mit HSD-Elementen und einer Ballastbox; siehe Abbildung 28.

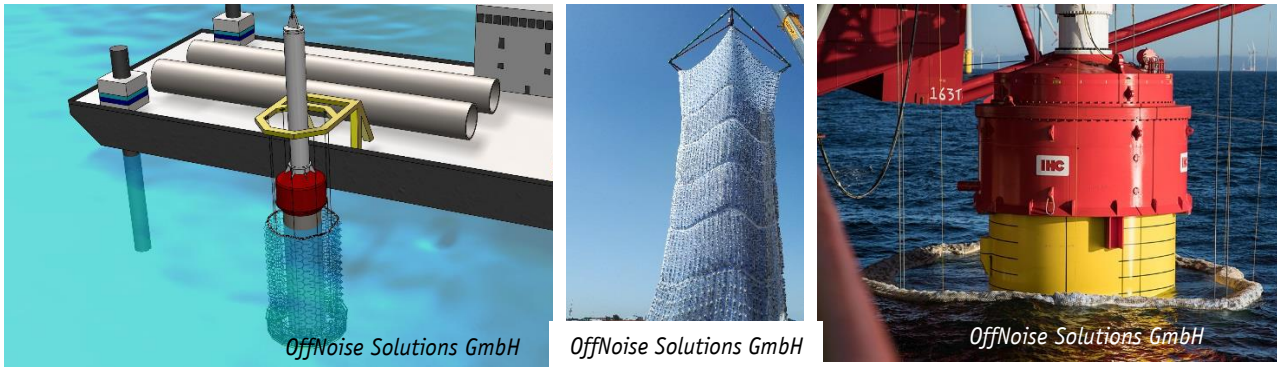


Abbildung 28: *Links: schematische Zeichnung eines vollständig mobilisierten HSD-Systems, welches unterhalb einem am Installationsschiff befestigten Pfahlführungssystem hängt. Mitte: Netz mit HSD-Elementen; HSD-System während einer Pfahlrammung. (Quelle: OffNoise Solutions GmbH)*

Die HSD-Elemente am Netz bestehen aus unterschiedlichen Schaumstoffelementen in verschiedenen Größen und unterschiedlichen Materialien. Jedes HSD-Element agiert im Prinzip wie ein lokaler Resonator und kann auf unterschiedliche Frequenzen und Wassertiefen abgestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass sich die Größe der HSD-Elemente im Wasser aufgrund des statischen Gegendrucks verkleinern. Die (Weiter-) Entwicklung des HSD-Systems wurde durch zwei F&E-Vorhaben[13] unterstützt.

Die Hebevorrichtung kann üblicherweise am Installationsschiff fest installiert oder unter der notwendigen Pfahlführung befestigt werden. Durch die Hebevorrichtung und die Ballastbox kann das Netz mit den HSD-Elementen vor der Rammung zwischen der Wasseroberfläche und dem Meeresboden aufgespannt werden und die gesamte Wassersäule abdecken. Die Hebevorrichtung und die Ballastbox wurden bisher für jedes Projekt individuell angefertigt, so dass der Ablauf zur Pfahl-Positionierung und HSD-Ausbringung sehr variabel ausgestaltet wurde. In einem Bauvorhaben wurde sogar ein zu öffnendes HSD-System inkl. Hebevorrichtung und Ballastbox entwickelt und konnte erfolgreich im Serieneinsatz verwendet werden. Innenliegende Rollen halten die Ballastbox um den Monopfahl in Position.

Das HSD-System, insbesondere das HSD-Netz mit seiner Belegung mit HSD-Elementen sowie die Hebevorrichtung, wird projektspezifisch entwickelt und gefertigt. Vor Beginn der Installation werden immer Hafen-Tests und teilweise auch Offshore-Tests seitens des BSH angeordnet. Die Tests dienen der Prüfung der Funktionalität des Systems, insbesondere für die Hebevorrichtung inkl. Ballastbox und des HSD-Netzes.

---

[13] Untersuchung und Erprobung von Hydroschall-Dämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA, FKZ 325365, gefördert durch das PTJ und BMUB.

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 (Kurztitel: triad), gefördert durch BMWi und PTJ, FKZ 0325681; Laufzeit 12/2013 bis 7/2015; https://www.tu-braunschweig.de

Das gesamte System, bestehend aus Ballastbox, Netzen mit HSD-Elementen sowie Hebevorrichtung, kann für den Transport sowie zur Mobilisierung und Demobilisierung mittels Windensystemen teleskopartig ineinander gefahren werden.

Das HSD-System ist ein pfahlnahes Schallschutzsystem und wurde bisher bei Wassertiefen von bis zu 41 m und Pfahldurchmessern von bis zu 8 m (Monopfähle) zum Einsatz gebracht. Zusätzlich wurde das HSD-System einmalig als Prototyp bei der Installation eines Skirt-Piles mit einer Rammschablone (Pre-Piling-Verfahren; siehe 5.2.1) eingesetzt. Dabei setzte die Ballastbox auf der Rammschablone auf und der verwendete Rammhammer wurde innerhalb des HSD-Netzes zwischen der Wasseroberfläche und der Rammschablone geführt. Dieser Einsatz erfolgte allerdings in der Ostsee ohne große Strömung.

Als zusätzliche, schallmindernde Maßnahme können zum einen HSD-Elemente um und unter der Ballastbox befestigt werden und zum anderen kann ein kleiner Blasenschleier an oder in der Ballastbox vorinstalliert werden. Die dafür notwendige Pressluft kann vom Installationsschiff oder von einem externen Kompressor an Bord des Installationsschiffes zur Verfügung gestellt werden. Beide Maßnahmen dienen dazu, eventuelle, störende Interaktionen (Schwingungskopplungen) zwischen der Ballastbox, dem zu rammenden Pfahl und dem Meeresboden bzw. Kolkschutz zu minimieren.

Bei allen bisherigen Einsätzen hat sich herausgestellt, dass die Schallminderung des Systems konstant und verlässlich ist, allerdings zumeist nur bei tiefen Frequenzen. Das System ist daher ausschließlich für den kombinierten Einsatz mit einem Blasenschleiersystem geeignet.

Bei der Anwendung dieses pfahlnahen Schallschutzsystems mit mehreren hundert Anwendungen innerhalb fünf deutscher OWP-Bauvorhaben konnten bisher nur zu Beginn der Entwicklung technische Probleme mit der Hebevorrichtung festgestellt werden. Ansonsten zeigte sich bei sämtlichen anderen Anwendungen, dass dieses Schallschutzsystem offshore-tauglich, fehlerfrei und robust zum Einsatz gebracht werden konnte.

Das HSD-System wurde bisher entweder von Hubplattformen oder von schwimmenden Installationsschiffen aus eingesetzt.

Die erzielte Schallminderung mit dem HSD-System zeigte sich dabei unabhängig von

- der Wassertiefe (bis 41 m), basierend auf den unterschiedlichen Layouts der HSD-Elemente am Netz,
- der vorherrschenden Strömung (Erfahrungen bis maximal 0,75 m/s liegen vor) und
- der Raumrichtung (omnidirektionale Schallminderung).

Bei der Anwendung unter Offshore-Bedingungen stellten sich nachfolgende Vorteile des HSD-Systems heraus:

- das HSD-System ist auch bei variablen Wassertiefen von 23 m bis 41 m innerhalb eines Baugebietes problemlos und ohne Modifikationen einsetzbar,

- bei guter konstruktiver Ausführung bewirkt das HSD-System verlässlich eine Schallminderung von 10 dB im tieffrequenten Bereich (< 250 Hz),
- gut einsetzbar in Wassertiefen bis 40 m.

Allerdings zeigen die Erfahrungen aus den bisherigen OWP-Bauvorhaben die nachfolgenden Einschränkungen:

- Die Handhabung, insbesondere die der Absenk- und Hebevorrichtung unter Offshore-Bedingungen, ist komplex. Bisher wurden die Absenk- und Hebevorrichtung und die Ballastbox für jedes Projekt und jedes Installationsschiff individuell entwickelt und konstruiert. Diese Absenk- und Hebevorrichtung kann bei ungünstiger Systemausführung zudem ungewollte Ankopplungsgeräusche zwischen Pfahl und Ballastbox produzieren.
- Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit des HSD-Systems ist stets durch Hafen- und Offshore Tests vor Beginn der Installation zu erbringen,
- Die konstruktive Ausführung des HSD-Systems ist immer bei der Installation in Zusammenhang mit der Erfassung von Daten u. a. zur Vertikalität des Pfahls zu berücksichtigen.
- Das HSD-System kann nur als komplementäres System zu einem Blasenschleiersystem eingesetzt werden, auch bei geringen Wassertiefen und bei Pfählen mit kleinen Durchmessern.
- Eine verlässliche Schallminderung ist nur im tieffrequenten Bereich gegeben, dies bedeutet eine geringere biologische Relevanz für die Schlüsselart Schweinswal.
- Bodenkopplungen können grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden; siehe Kapitel 5.1.2.
- Die Lebensdauer der HSD-Elemente und des Netzes sind begrenzt, so dass ein Austausch nach ca. 30 Anwendungen (Herstellerangaben) notwendig werden kann.
- Die Netzauslegung hinsichtlich der Länge und der Belegung mit HSD-Elementen ist an die Masse und die Größe der Ballastbox projektspezifisch anzupassen. Je mehr HSD-Elemente verwendet werden, desto mehr Abtrieb muss von der Ballastbox produziert werden.
- Der Einsatz des HSD-Systems ist mit zusätzlichem Zeitaufwand verbunden, da dieses System eine zusätzliche Komponente der Installation darstellt.

6.3.3 Großer Blasenschleier (engl. Big Bubble Curtain – BBC)

Das einzige pfahlferne Schallschutzsystem ist der einfache oder doppelte Große Blasenschleier (engl. single or double Big Bubble Curtain – BBC bzw. DBBC). Dieses System ist derzeit von mehreren Anbietern am Markt verfügbar und zwei Anbieter haben einen einfachen und/oder doppelten Großen Blasenschleier bereits im Serieneinsatz bei bereits abgeschlossenen OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee eingesetzt.

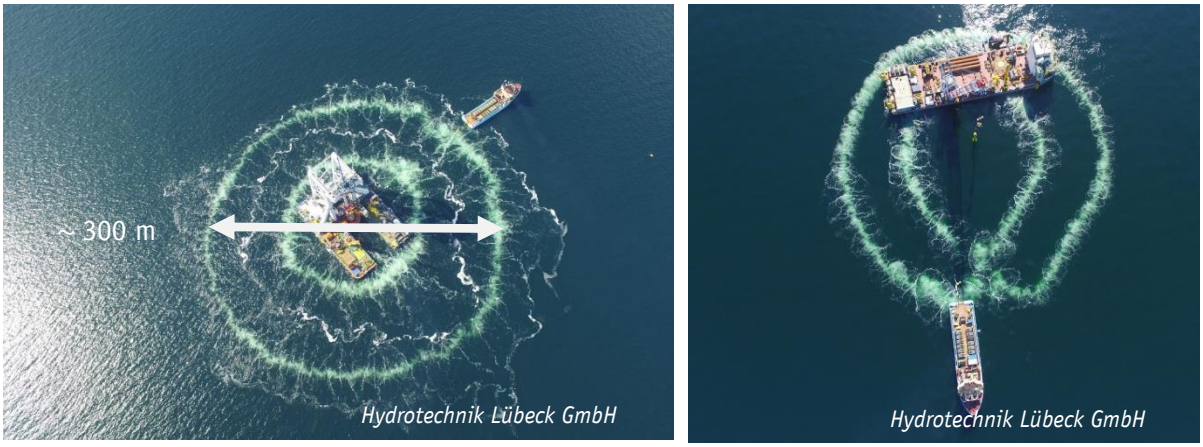


Abbildung 29: *Doppelter Großer Blasenschleier: links: kreisförmige Auslegung aufgrund sehr geringer Strömung; rechts: elliptische Auslegung aufgrund von Strömung (größerer Durchmesser in Strömungsrichtung). (Quelle: Hydrotechnik Lübeck GmbH)*

Grundsätzlich besteht der Große Blasenschleier aus perforierten Düsenschläuchen inkl. nicht perforierter Zuluftschläuche, Kompressoren zur Generierung von komprimierter Luft und einem Begleitschiff mit Vorrichtungen (Winden und Luftverteilungssystem) für die Auslegung und die Einholung der Düsenschläuche und der Zuluftschläuche sowie für die Lagerung und den Betrieb der notwendigen Kompressoren. Die Düsenschläuche werden zudem mit einer ausliegenden Ballastierung versehen, so dass die Düsenschläuche auch im Betrieb durch den Abtrieb der Ballastierung fest auf dem Meeresboden verbleiben. Mittels eines Begleitschiffes wird der Düsenschlauch / werden die Düsenschläuche am Meeresboden ausgelegt und mittels Zuluftschläuche an die Kompressoren für die Lufteinspeisung angeschlossen. Aufgrund der Druckunterschiede innerhalb und außerhalb der Düsenschläuche tritt die Luft aus den Luftauslässen und die Luft steigt in Richtung der Wasseroberfläche. Dabei spielt der statische Wasserdruck eine entscheidende Rolle für die Größe einzelner Luftblasen. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt der statische Druck im Wasser stetig zu, so dass das definierte, zugeführte Luftvolumen stetig abnimmt. Die Größe und die Form der Luftblasen kann nur sehr eingeschränkt durch die Luftauslässe (Löcher) im Düsenschlauch beeinflusst werden. I. d. R. bilden sich innerhalb der Wassersäule unterschiedliche Größen und Formen von Luftblasen aus. Die durchschnittliche Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen beläuft sich auf ca. 0,3 m/s (Mittelwert über alle Blasengrößen), wobei größere und kleinere Luftblasen auch durchaus Aufstiegsgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 0,8 m/s aufweisen können (Nehls & Bellmann, 2015). I. d. R. steigt die Aufstiegsgeschwindigkeit mit der Größe der Luftblasen stetig an. Während des Aufstiegs zur Wasseroberfläche sind die Luftblasen der vorherrschenden Strömung ausgesetzt und werden in Strömungsrichtung verdriftet. Diese Verdriftung kann bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 0,75 m/s (entspricht ca. 1,5 kn) durch eine elliptische Auslegungsform der Düsenschläuche in Strömungsrichtung zumeist kompensiert werden.

Die Entwicklung unter Offshore-Bedingungen und die Weiterentwicklung des Großen Blasenschleiers wurden zudem durch zwei geförderte Forschungsprojekte[14] in der deutschen AWZ der Nordsee unterstützt (Diederichs et al., 2014; Nehls & Bellmann, 2015).

Dieses Schallschutzsystem ist das am häufigsten eingesetzte Schallschutzsystem mit mehreren hundert Anwendungen in Wassertiefen von wenigen Metern im Küstenbereich bis hin zu 41 m Wassertiefe. Es kam bereits bei allen bisher eingesetzten Fundamentkonstruktionen zum Einsatz, d. h. für Monopfähle, Jacket-Konstruktionen, Tripods und Tripiles. Darüber hinaus gibt es Erfahrungen in weiteren Ländern mit Blasenschleiersystemen im Küstenbereich und in Flüssen (Nearshore).

Unabhängig davon wurden in Europa bereits Große Blasenschleier bei Sprengungen von Kampfmittelaltlasten (engl. UXO-clearance) in bis zu 70 m Wassertiefe erfolgreich in der Nord- und Ostsee eingesetzt. Dabei wurden jedoch zumeist keine Unterwasserschallmessungen zur Evaluierung der eingesetzten Großen Blasenschleier durchgeführt.

Große Blasenschleiersysteme in einer projektspezifisch angepassten, technischen Ausführung (optimierte Systemkonfiguration) sind in der Lage, hohe Frequenzen sehr effektiv zu mindern. Dagegen fällt das Minderungspotenzial zu tiefen Frequenzen stetig ab; Kapitel 6.4.2.1.

Bei der Anwendung unter Offshore-Bedingungen stellten sich nachfolgende Vorteile des Großen Blasenschleiers heraus:

- unabhängige Auslegung der Düsenschläuche vom Installationsschiff durch ein variables Auslegungsverfahren[15],
- zugeführte Luftmenge kann durch Anzahl und Typ der eingesetzten Kompressoren variiert werden (Luft-Wasser-Gemisch),
- Schallschutzsystem ist unabhängig von dem Fundamenttyp und dem Installationsschiff,
- einsetzbar in unterschiedlichen Wassertiefen,
- durch verlässliche Schallminderung in höheren Frequenzen zeigt sich eine hohe biologische Relevanz für die Schlüsselart Schweinswal.

Allerdings zeigen die Erfahrungen aus den bisherigen OWP-Bauvorhaben die nachfolgenden Einschränkungen:

[14] www.hydroschall.de. Forschungsvorhaben Hydroschall-OFF BW (2011-2012). FKZ 325309 gefördert durch PTJ und BMU; Weiterentwicklung Großer Blasenschleier (2013 – 2015). FKZ 325645 gefördert durch PTJ und BMWi.

[15] Die notwendigen Düsenschläuche können vor der Ankunft des Installationsschiffes am Meeresboden ausgelegt werden (Pre-Laying-Verfahren) oder erst nachdem das Installationsschiff auf Position für die nächste Fundamentgründung ist (Post-Laying-Verfahren). Bei schwimmenden Installationsschiffen mit Verankerungen zur Positionierung bietet sich ein Pre-Laying-Verfahren an. Je nach Größe und Auslegungsform wird das Pre-Laying-Verfahren aber auch bei Hubplattformen teilweise eingesetzt.

- zusätzliche Schiffskapazität ist für die Auslegung und den Betrieb des Blasenschleiers erforderlich,
- der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der verschiedenen Komponenten des Blasenschleiersystems sind stets durch Hafen- und Offshore Tests vor Beginn der Installation zu erbringen,
- die Komponenten (Kompressoren, Düsenschläuche) sind stets so zu konfigurieren, dass eine gute Balance zwischen Schallminderung und Umweltschutz gewährleistet ist,
- die Schallminderung kann je nach Meeresgebiet und vorherrschender Strömung richtungsabhängig ausfallen.

Auf der Grundlage der vorhandenen Daten der Forschungsprojekte und der Messdaten aus verschiedenen Offshore-Bauvorhaben konnten technische und physikalische Mindestanforderungen an die Anwendung eines optimierten einfachen und doppelten Großen Blasenschleiers abgeleitet werden, um eine maximale Schallminderung bis in Wassertiefen von 41 m bei Impulsrammarbeiten zu erreichen (Nehls & Bellmann, 2015). Diese Mindestanforderungen wurden im Zuge der Bauvorhaben in den Jahren 2016 bis 2019 in Deutschland nochmals aus der Praxis heraus deutlich erweitert (MarinEARS[2]). Hintergrund ist, dass in den letzten Jahren der Pfahldurchmesser stetig zugenommen hat und damit auch der Schalleintrag ins Wasser bzw. die Anforderungen an den Schallschutz gestiegen sind.

Im Nachfolgenden werden somit alle Angaben bezüglich eingesetzter Systemkonfiguration und erzielter Schalldämpfung anonymisiert vom OWP-Bauvorhaben und BBC-Lieferanten dargestellt. Im Falle der Nichteinhaltung dieser technischen und physikalischen Mindestanforderungen konnte bei fertiggestellten Bauprojekten im Offshore-Bereich gezeigt werden, dass die Schallreduzierung erheblich abnimmt und im schlimmsten Fall keine Schallminderung erfolgt (Bellmann et al., 2018; Nehls & Bellmann, 2015).

Die zu erzielende Schallreduzierung hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

(i) verwendete Luftmenge (Luft-Wasser-Gemisch),

(ii) Lochgröße und Lochabstand,

(iii) sowie im Falle eines doppelten Großen Blasenschleiers der Abstand zwischen den beiden am Meeresgrund ausgelegten Düsenschläuchen (abhängig von der Strömung und der Wassertiefe),

(iv) Wassertiefe bzw. statischer Gegendruck (Luft-Wasser-Gemisch),

(v) vorhandene Strömung[16].

[16] Nach Stand der Technik kann ein optimierter Großer Blasenschleier bis zu einer Strömung von ca. 1 kn (entspricht ca. 0,75 m/s) problemlos eingesetzt werden. Größere Strömungen wirken sich negativ auf die Schallminderung in Strömungsrichtung aus.

Es gibt einen Zusammenhang zwischen der eingebrachten Luftmenge und der erzielten Schallreduktion. Der Impedanzsprung zwischen Wasser und Luft-Wasser-Gemisch ist für die schallmindernde Wirkung eines Blasenschleiers im akustischen Fernfeld ausschlaggebend. Darüber hinaus wurde in einem Forschungsprojekt[14] ein halbempirisches, hydrodynamisches Blasenschleiermodell entwickelt und getestet. Damit kann die Systemkonfiguration eines Blasenschleiers im Voraus auf ein entsprechendes Bauprojekt optimiert werden (Bellmann & Nehls, 2015).

Basierend auf Berechnungen, Messdaten und Erfahrungen mit der Handhabung aus der Praxis von mehr als 800 Pfahlinstallationen müssen die folgenden Anforderungen an die technische Umsetzung eines Großen Blasenschleiers erfüllt werden, damit eine optimale und richtungsunabhängige Schallminderung erzielt werden kann:

- Lochgröße (Durchmesser) und Lochabstand: 1 – 2 mm (gebohrt), alle 20 – 30 cm,
- verwendete Luftmenge: $\geq 0{,}5\ m^3/(min \cdot m)$,
- regelmäßige Wartung der verwendeten Düsenschläuche
  (d. h. Prüfung der verfügbaren Lochöffnungen im Düsenschlauch; ggfs. nachbohren oder Reinigung von Löchern),
- keine turbulenzerzeugenden Hindernisse in den Düsenschläuchen, wie z. B. Ballastketten, Sand, etc.,
- Abstand der Düsenschläuche:
  - Mindestabstand zwischen Blasenschleier und Rammbaustelle von 30 m bis 40 m; diese Angabe bezieht sich auf den Abstand von der Quelle zum BBC an der Wasseroberfläche; aufgrund von Strömung und Verdriftungserscheinungen ist der Abstand auf dem Meeresboden projektspezifisch festzulegen und ist i. d. R. größer.
  - Mindestabstand zwischen innerem und äußerem Düsenschlauch für einen doppelten Großen Blasenschleier entspricht mindestens der Wassertiefe am Einsatzort. Diese Angabe ist stark strömungsabhängig.
- Düsenschlauchlänge:
  - Die minimale Düsenschlauchlänge eines einfachen, geschlossenen Düsenschlauches (z. B. innerer Ring bei einem DBBC) beträgt i. d. R. ≥ 600 m bei zweiseitiger Lufteinspeisung,
  - die maximale Düsenschlauchlänge eines einzelnen, geschlossenen Düsenschlauches (z. B. äußerer Ring bei einem DBBC) ≤ 1.000 m bei zweiseitiger Lufteinspeisung,
  - die Gesamtlänge eines DBBCs beträgt ≤ 1.750 m (Details siehe Kapitel 3).

- Die maximale Anzahl Kompressoren beim doppelten Großen Blasenschleiersystem ist durch das BSH auf 20 Stück zzgl. 2 Stk Ersatz eingeschränkt.[17]
- Die Lebensdauer der einzusetzenden Düsenschläuche ist begrenzt. Das BSH fordert eine maximale Einsatzdauer von ca. 40 Anwendungen pro Düsenschlauch. Basierend auf Erfahrungen kann ein Düsenschlauch jedoch bis zu 100 Mal eingesetzt werden, wenn regelmäßig entsprechende Wartungsarbeiten und Sichtprüfungen erfolgen. Bei zu häufiger Anwendung eines Düsenschlauches kann es aufgrund der sehr hohen mechanischen Beanspruchung zu Materialermüdungserscheinungen kommen[18]. Bei größeren Bauvorhaben fordert das BSH zumeist den Einsatz von neuen Düsenschläuchen, Kapitel 3.
- In einem Forschungsvorhaben wurden Drucksensoren innerhalb des Düsenschlauches entwickelt und verbaut (Nehls & Bellmann, 2015). Es zeigte sich, dass sich mit zunehmender Entfernung zu den Lufteinspeisepunkten der innere Druck im Düsenschlauch erwartungsgemäß reduziert. Es muss mindestens ein Überdruck von 2 – 3 bar im Gegensatz zum statischen Wasserdruck an jeder Luftaustrittsöffnung des Düsenschlauches vorliegen, um einen gleichmäßigen und optimalen Luftauslass zu gewährleisten, damit die resultierende Schallminderung in alle Richtungen möglichst gleich ist. Zudem zeigten sich bereits Druckverluste zwischen den Kompressoren an Bord des BBC-Begleitschiffes und den am Meeresboden befindlichen Lufteinspeisepunkten. Für eine Wassertiefe von bis zu 40 m ist ein Betriebsdruck der komprimierten Luft von 9 bar bis 10 bar pro Kompressor an Bord des BBC-Begleitschiffes i. d. R. ausreichend.
- Nach derzeitigem Stand der Technik beträgt der Düsenschlauchdurchmesser 100 mm. Die Ballastierung ist von außen am Düsenschlauch zu befestigen (nicht innerhalb).

  Zurzeit werden auch Versuche mit größeren Durchmessern durchgeführt, um die Luftmenge nochmals deutlich erhöhen zu können. Dies führte bei Testanwendungen bisher zu erheblichen Problemen mit der Ballastierung, die derzeit noch nicht vollständig gelöst werden konnten; Kapitel 7.3.3.
- Die Betriebszustände jedes einzelnen Kompressors müssen regelmäßig dokumentiert werden (aus der Drehzahl und dem Betriebsdruck jedes einzelnen Kompressors ist die komprimierte Gesamtluftmenge (engl. Free Air Delivery – FAD) für den Großen Blasenschleier zu berechnen).

[17] Hintergrund für die Einschränkung der Anzahl an Kompressoren ist ein naturverträglicher Einsatz dieses Schallschutzsystems hinsichtlich des CO_2-Ausstoßes sowie ein ausgewogenes Preis-Leistungsverhältnis. Diese Anzahl der Kompressoren kann von einem BBC-Begleitschiff inkl. Windensysteme, etc. transportiert werden.

[18] Ein Düsenschlauch besteht aus mehreren Materialien und Schichtungen. Abschälungen der inneren Gummierung verursachen Turbulenzen im Düsenschlauch, die den Luftstrom innerhalb des Düsenschlauches negativ beeinflussen.

I. d. R. nimmt die komprimierte Luftmenge mit dem eingestellten Betriebsdruck am Kompressor leicht ab, so dass für die Gewährleistung von 0,5 $m^3/(min \cdot m)$ mehr Kompressoren bei ansteigendem Betriebsdruck notwendig sind.

- Strömungen $\leq$ 1,5 kn bzw. ca. 0,75 m/s. Bei größeren Strömungen nimmt die Schallminderung in Strömungsrichtung aufgrund von Verdriftungseffekten erheblich ab. Die Folge ist eine richtungsabhängige Schallminderung des eingesetzten Blasenschleiers.
- Grundsätzlich sind ölfreie Kompressoren (entspricht Luftqualität der Klasse 0 der ISO 8573-1, 2010, und einem Einsatz von Treibstoff nach EN590 für die Kompressoren) einzusetzen, um eine Verschmutzung des Wassers und der Luft zu vermeiden.

Es zeigte sich in der Praxis, dass ein Großer Blasenschleier ein sehr effektives, robustes und offshoretaugliches Schallschutzsystem sein kann, jedoch ist jeder Blasenschleier individuell an jedes einzelne Bauvorhaben hinsichtlich der standortspezifischen und technisch-konstruktiven Eigenschaften, wie Strömung, Wassertiefe, Installationsablauf, etc., anzupassen. Zudem zeigte sich, dass ein Großer Blasenschleier zu Beginn eines Bauvorhabens einige Male intensiv gewartet werden muss, d. h. Nachbohrungen der Düsenschläuche, bis sich eine optimierte und omnidirektionale Schallminderung einstellt. Bei Nichteinhaltung der o. g. Mindestanforderungen bzw. Spezifikationen nimmt die Schallminderung erheblich ab und beträgt im schlimmsten anzunehmenden Fall lediglich eine Gesamtschallminderung von wenigen Dezibel; siehe Abbildung 30.

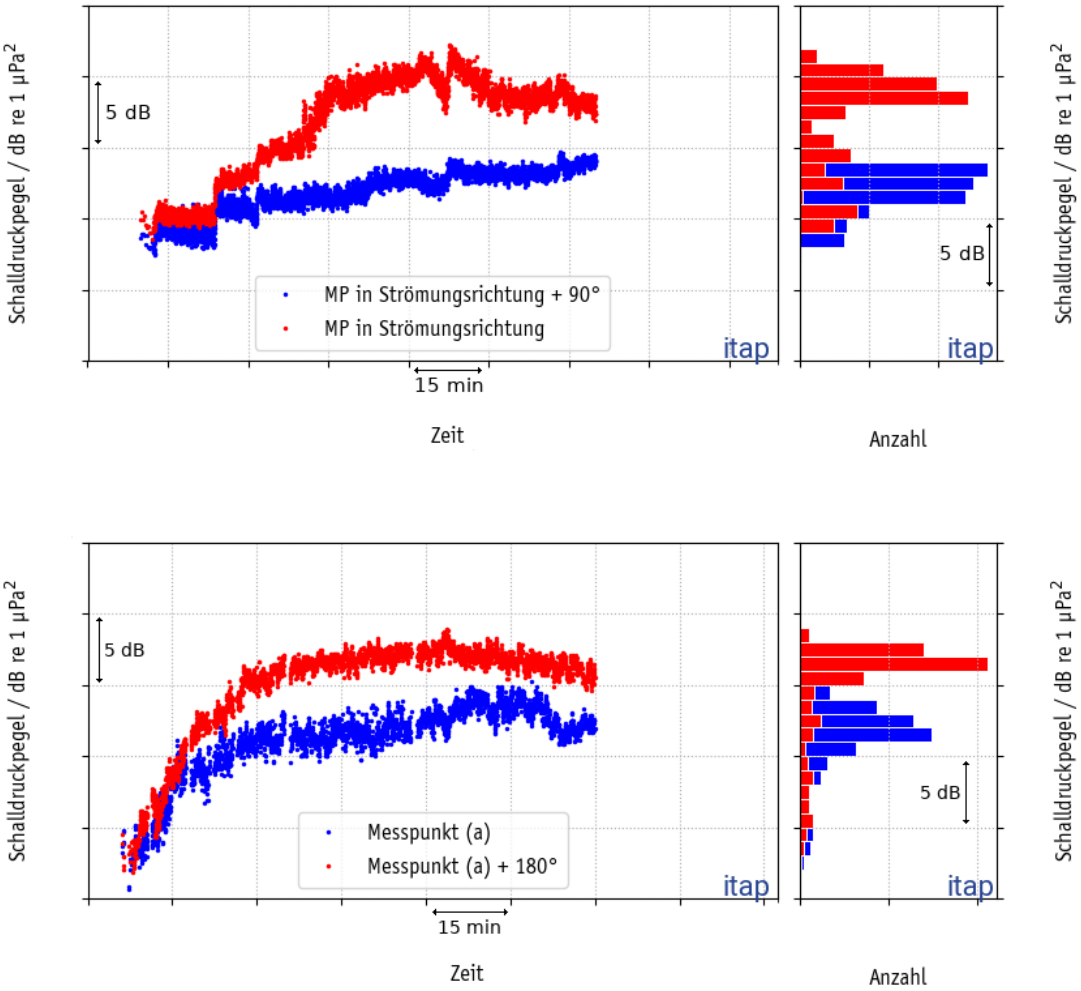


Abbildung 30: *Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels an zwei Messpositionen in 750 m in unterschiedlichen Raumrichtungen zur Monopfahl-Installation bei Anwendung eines Großen Blasenschleiers als sekundäres Schallschutzsystem. Oben: Der Unterschied zwischen den beiden Messpositionen resultierte aus Verdriftungseffekten basierend auf einer Strömung > 2 m/s. unten: Der Unterschied zwischen den beiden Messpositionen resultierte durch einen nicht gleichverteilten Lufteintrag ins Wasser. Durch Nachbohrungen des Düsenschlauches konnten diese Unterschiede in unterschiedlichen Richtungen minimiert werden.*

6.3.4 Grout Annulus Bubble Curtain (GABC)

Bei der Errichtung von Jacket-Strukturen im Post-Piling-Verfahren werden die zu rammenden Pfähle durch sogenannte Pfahlführungen (engl. pile-sleeves) gerammt. Dabei gibt es zwei mögliche Arten von Pfahlführungen:

(i) Die Pfahlführung ist ein fester Bestandteil der Jacket-Konstruktion und reicht von der Unterkante, d. h. dem Meeresboden, bis zur Oberkante oberhalb der Wasseroberfläche der gesamten

Jacket-Struktur, d. h. die Pfähle werden immer oberhalb der Wasseroberfläche gerammt und die Pfahlführung deckt die gesamte Wassersäule ab (Main-Piles; Kapitel 5.2.1).

(ii) Die Pfahlführung ist lediglich mehrere Meter hoch und ist an der Unterkante starr mit der Jacket-Struktur verbunden. Alternativ kann anstelle der Jacket-Konstruktion auch eine Rammschablone zum Einsatz kommen. Die Pfähle (Skirt-Piles genannt; Kapitel 5.2.1) werden somit im Rammverlauf unterhalb der Wasseroberfläche gerammt und enden nur wenige Meter oberhalb des Meeresbodens bzw. der Pfahlführung.

Bei den beiden beschriebenen Verfahren kann in den Spalt zwischen Pfahl und Pfahlführung komprimierte Luft eingeführt werden. Die komprimierte Luft wird i. d. R. über die fest installierten Rohrleitungen für die Zementierung der Pfähle (engl. grouting lines) eingeführt, die sich zumeist an der Unterseite der Pfahlführung befinden. Die Luftblasen steigen im Spalt zwischen Pfahl und Pfahlführung nach oben auf. Der Spalt füllt sich somit mit einem Luft-Wasser-Gemisch.

Im Fall von Pfahlführungen, die nicht bis zur Wasseroberfläche reichen, kann an der Oberkante der Pfahlführung die aufsteigende Luft (Luftblasen) entweichen und bis zur Wasseroberfläche aufsteigen. Um den Pfahl bildet sich somit bis zur Wasseroberfläche ein „kleiner" Blasenschleier aus (Grout Annulus Bubble Curtain – GABC). Strömungen, wie z. B. in der Nordsee, führen zur Verdriftung der Luftblasen oberhalb der Pfahlführung. Aus diesem Grund ist nicht auszuschließen, dass strömungsabhängige, große Öffnungen bzw. Löcher durch Verdriftungseffekte im Blasenschleier entstehen, die die Schallminderung erheblich herabsetzen. Dieses Prinzip ist vergleichbar mit dem „gestuften kleinen Blasenschleier", der im OWP *Alpha Ventus*[19] einmalig getestet wurde. Hier gab es allerdings keine „Führung" im unteren Bereich, so dass sich aufgrund der starken Strömung sämtliche Luftblasen auf einer Seite des Pfahles befanden.

Reicht die Pfahlführung bis zur Wasseroberfläche, so wird der GABC bis zur Wasseroberfläche geführt. Für diesen Fall gibt es bereits Erfahrungen aus mehreren Jacket-Konstruktionen in der deutschen AWZ bis in Wassertiefen von 30 m.

Es ist davon auszugehen, dass die Spaltbreite und die Menge an eingeführter Luft einen maßgeblichen Einfluss auf das Luft-Wasser-Gemisch und damit auf die erzielte Schallminderung haben. Aus den bestehenden empirischen Datensätzen lässt sich jedoch keine Mindestangabe der zuzuführenden komprimierten Luftmenge ableiten. Der Spalt zwischen Pfahl und Pfahlführung beträgt zumeist nur wenige Zentimeter, so dass nur eine verhältnismäßig geringe Luftmenge in diesen Spalt eingeführt werden kann. I. d. R. wurde nur ein Kompressor für die Bereitstellung der komprimierten Luftmenge verwendet.

[19] Verbundprojekt: Erforschung der Schallminderungsmaßnahme „Gestufter Blasenschleier (Little Bubble Curtain)" im Testfeld Alpha Ventus, FKZ325122, gefördert durch PTJ und BMU.

Erfahrungen zeigen allerdings nachfolgende Einschränkungen:

- Ein GABC muss individuell für jedes Jacket-Design angepasst werden.
- Bodenkopplungen können grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden; siehe Kapitel 5.1.2.
- Die zugeführte Luftmenge ist durch das Spaltmaß begrenzt.
- Dieses Schallschutzsystem ist begrenzt auf den Einsatz bei Jacket-Konstruktionen.
- Bei Skirt-Piles wird es ggf. zu Verdriftungseffekten oberhalb der Pfahlführung kommen und somit zu einer richtungsabhängigen Schallminderung,
- Das Schallminderungspotenzial ist als gering verglichen zu den drei genannten Schallschutzsystemen einzustufen,
- Dieses technische Schallschutzsystem ist lediglich ein unterstützendes Schallschutzsystem, welches in Kombination mit einem Großen Blasenschleier verwendet werden kann, um die deutschen Lärmschutzwerte einzuhalten.

6.3.5 Kombination aus pfahlnahem und pfahlfernem Schallschutzsystem

Bisher wurden nachfolgende Kombinationen von sekundären, technischen Schallschutzsystemen für die Installation von Monopfählen im Serieneinsatz beim Bau der Fundamentstrukturen mittels Impulsrammverfahren in deutschen OWP-Bauvorhaben verwendet:

Folgende Kombinationen haben zur verlässlichen Einhaltung der Lärmschutzwerte bei gleichzeitiger Einhaltung von Umweltschutzaspekten und praktikablen Integration in das Installationsverfahren geführt:

- IHC-NMS + einfacher oder doppelter Großer Blasenschleier (BBC oder DBBC),
- HSD + doppelter Großer Blasenschleier (DBBC),

Lösungen, die sich als weniger praktikabler bei der Integration in das Installationsverfahren herausgestellt haben oder die Einhaltung der Lärmschutzwerte nicht verlässlich erbringen konnten:

- doppelter Großer Blasenschleier zuzüglich eines halboffenen, einfachen Großen Blasenschleiers in Richtung FFH-Schutzgebiet,
- zwei doppelte Große Blasenschleier, ergo ein vierfacher Großer Blasenschleier.

Für die Installation von Jacket-Fundamentstrukturen wurden bisher erfolgreich im Serieneinsatz nachfolgende Kombinationen angewendet:

- Einfacher und doppelter Großer Blasenschleier (BBC & DBBC),
- Grout Annulus Bubble Curtain (GABC) + doppelter Großer Blasenschleier (DBBC),

- HSD + doppelter Großer Blasenschleier (DBBC) - einmalig, HSD-System im Prototypen-Design.

Jede der o. g. Kombinationen von Schallschutzsystemen wurde zudem noch in Kombination mit einem schalloptimierten Rammverfahren (siehe Kapitel 5.2.2) eingesetzt.

Bei Monopfahldurchmessern ab 6 m und / oder Wassertiefen größer 25 m hat sich die Anwendung von zwei unabhängigen Schallschutzsystemen – einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem – zur Einhaltung der deutschen Lärmschutzwerte bewährt bzw. wird seitens der deutschen Zulassungsbehörde gefordert. Zumeist findet zudem ein schalloptimiertes Rammverfahren zusätzlich für Monopfähle mit großem Pfahldurchmesser Anwendung.

Um die deutschen Lärmschutzwerte einzuhalten, ist bei der Jacket-Installation der erfolgreiche Einsatz einer Kombination von zwei Schallschutzsystemen sehr stark abhängig von der Wassertiefe, dem Pfahl-Design und der vorherrschenden Strömung. Basierend auf Erfahrungen kann auch lediglich der Einsatz eines doppelten Großen Blasenschleiers zur Einhaltung der Lärmschutzwerte ausreichen.

6.4 Evaluierung der Wirksamkeit von sekundären Schallschutzsystemen

6.4.1 Definition und Messkonzept der Durchgangsdämpfung

Zur quantitativen Charakterisierung der Wirkungsweise eines Schallschutzsystems wird in der Regel die (Schall-) Durchgangsdämpfung bzw. Einfügungsdämpfung (engl. insertion loss) betrachtet.

Hierzu werden die Differenzen zwischen den Einzelereignispegeln (L_E bzw. SEL) der Referenzmessung (ohne Schallschutz) und der zu beurteilenden Schallschutzvariante (Testmessung) gebildet. Basierend auf den Ergebnissen eines F&E-Vorhabens wurde eine technische Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schallminderungsmaßnahmen (BSH, 2013) entwickelt[14]. Diese Messvorschrift wurde 2017 in eine Spezifikation der Deutschen Normungsstelle DIN überführt.

Prinzipiell sind für die Bestimmung der erzielten Schallminderung Referenzmessungen ohne Anwendung von technischen Schallschutzmaßnahmen und Testmessungen mit einer definierten Schallschutzkonfiguration unter großmaßstäblichen Offshore-Bedingungen zwingend notwendig. Dabei existieren zwei unterschiedliche Methoden:

(i) die indirekte und
(ii) die direkte Methode.

Bei der **(i) indirekten Methode** werden die Test- und Referenzmessungen an unterschiedlichen Fundamentstandorten (Monopfähle) bzw. bei unterschiedlichen Pfählen einer Jacket-Konstruktion am selben Fundamentstandort durchgeführt. Dabei ist zwingend auf die vergleichbaren, standortspezifischen und technisch-konstruktiven Eigenschaften, wie z. B. Pfahl-Design, Wassertiefe, Bodenwiderstand, verwendete Rammenergie, etc., zu achten. Der Vorteil der indirekten Methoden liegt an der Gewinnung von Messdaten für den gesamten Installationsprozess, d. h. vom „Soft-Start" bis zum Erreichen der finalen Einbindetiefe. Somit kann bei Verwendung der indirekten Methode neben der Bewertung des eigentlichen Installationsverfahrens auch die Effektivität eines schalloptimierten Rammverfahrens hinsichtlich der Rammdauer und der erzielten Schallminderung quantifiziert werden. Die indirekte Methode ist besonders wertvoll, wenn die Eigenschaften des Hammers untersucht und der Quellpegel zwecks Modellierung der Ausbreitung und der Optimierung von technischen Schallminderungssystemen verlässlich bestimmt werden sollen.

Bei **(ii) der direkten Methode** werden Test- und Referenzmessungen bei derselben Pfahlinstallation durchgeführt. Vorteil dieser Methode ist, dass einige standortspezifische Eigenschaften nahezu identisch sind. Nachteil dieser Methode ist, dass weder das Rammverfahren, noch die Effektivität des angewendeten Schallschutzsystems für die gesamte Installation des Pfahls bis zum Erreichen der finalen Einbindetiefe bestimmt werden können. Da sich i. d. R. der Bodenwiderstand und damit die zu verwendende Rammenergie mit der Einbindetiefe stetig verändert, ist die Vergleichbarkeit der Daten eingeschränkt. Zudem ist für die Mobilisierung und Demobilisierung von Schallschutzsystemen eine Rammunterbrechung vorzunehmen, so dass die Gesamtrammdauer sich erheblich verlängern kann. Eine Quantifizierung der Effektivität eines schalloptimierten Rammverfahrens hinsichtlich der Rammdauer und der erzielten Schallminderung ist mit der direkten Methode nicht durchführbar.

> *Technische Anmerkung:* Beim Einsatz eines IHC-NMS hat sich gezeigt, dass nur eine direkte Methode für Test- und Referenzmessungen möglich ist, da das IHC-NMS zusätzlich als Pfahlführung verwendet wird. D. h., dass die Rammung eines Monopfahls zunächst mit dem Einsatz eines IHC-NMS bis zu einer Einbindetiefe, in der der Monopfahl kurzfristig auch ohne Pfahlführung sicher stehen kann, erfolgt. Nach Demobilisierung des IHC-NMS erfolgt der Rest der Rammung dann ohne den Einsatz dieses Schallschutzsystems. Es ist jedoch zwingend darauf zu achten, dass unmittelbar vor und nach der Demobilisierung des IHC-NMS vergleichbare Rammenergien zum Einsatz kommen.
>
> *Technische Anmerkung:* I. d. R. ordnet das BSH Test- und Referenzmessungen in Anlehnung an die Messvorschriften (DIN SPEC 45653, 2017, und BSH, 2013) nach der indirekten Methode an.

Die DIN SPEC 45653 (2017) sieht darüber hinaus vor, dass die Messungen zur Evaluierung der Wirksamkeit von eingesetzten Schallschutzsystemen in mehreren Richtungen zu erfolgen hat, um zusätzlich Informationen über die Richtungsabhängigkeit des eingesetzten Schallschutzsystems zu erhalten.

I. d. R. sind die Messungen in 750 m und maximal 1.500 m Abstand zur Rammung durchzuführen, um einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand (≥ 10 dB nach BSH, 2011) gewährleisten zu können.

Die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit kann frequenzaufgelöst oder breitbandig erfolgen.

> *Technische Anmerkung:* Es hat sich gezeigt, dass Unterwasserschallmessungen in Entfernungen von mehr als 1.500 m zur Rammung nicht ohne weiteres für die Evaluierung der erzielten Schallminderung durch das eingesetzte Schallschutzsystem verwendet werden können. Insbesondere wenn sich Messpositionen außerhalb des Baufeldes befinden, kann nicht immer ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand gewährleistet werden (z. B. Einfluss von Schiffsgeräuschen).

Breitbandige Durchgangsdämpfung

Bei der breitbandigen Darstellung werden die Summenpegel der frequenzaufgelösten Einzelereignispegel (SEL) voneinander abgezogen. Je höher die Differenz ist, desto größer ist die Durchgangsdämpfung und desto besser ist das Schallschutzsystem bzw. dessen angewendete Konfiguration. Der Vorteil dieses Parameters ist, dass sich die schallmindernde Wirkung eines Schallschutzsystems mit einem Einzahlwert erfassen und beschreiben lässt. Zudem kann damit direkt die Einhaltung des deutschen Lärmschutzwertes beurteilt werden. Nachteil dieser Bewertungsmethode ist, dass keinerlei Informationen über die spektrale Abhängigkeit der Durchgangsdämpfung bekannt werden. Dies ist z. B. hinderlich, wenn gezielte Maßnahmen zur Verbesserung an den eingesetzten Schallschutzsystemen notwendig werden, um die deutschen Lärmschutzwerte einzuhalten. Unabhängig davon ist die frequenzabhängige Schallminderung zwingend erforderlich, wenn das Hörvermögen von unterschiedlichen Spezies im Fokus steht, wie es bei den technischen Richtlinien der NOAA (National Marine Fisheries Service, 2018) und Southall et al. (2019) der Fall ist, welche bei der Umweltverträglichkeitsstudie z. B. in den USA oder in UK zur Anwendung kommen; Kapitel 7.1.

Varianzen, hervorgerufen durch unterschiedliche maximale Rammenergien an den jeweiligen Fundamenten, bzw. Test- und Referenzmessungen wurden in den folgenden Darstellungen durch eine Normierung minimiert. Es wurde ein Pegelanstieg von 2,5 dB bei Verdopplung der Rammenergie vorausgesetzt; siehe Kapitel 5.2.2.

Spektrale Durchgangsdämpfung

Bei der spektralen Durchgangsdämpfung werden die jeweiligen Spektren der Referenz- (ohne Schallschutzmaßnahme) und der Testmessung (mit Schallschutzmaßnahme) voneinander abgezogen. In diesem Bericht wurde aus Gründen der besseren Übersicht das Spektrum der Referenzmessung von dem Spektrum der Testmessung abgezogen. Bei dieser Definition nimmt die erzielte Durchgangsdämpfung eines Schallschutzsystems mit zunehmender negativer Zahl zu. Positive Werte im Differenzspektrum

würden somit eine Verstärkung des Schallpegels durch die Anwendung eines Schallschutzsystems kenntlich machen.

Die spektrale Durchgangsdämpfung ist ein entscheidender Faktor für die Beurteilung der biologischen Relevanz von eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen abhängig von der zu betrachtenden Schlüsselart. Diese Thematik wird in Kapitel 7.1 diskutiert und wird zudem Gegenstand eines weiteren separaten, technischen Berichts.

Durchführung von Test- und Referenzmessungen nach der DIN SPEC 45653 (2017)

Pro OWP-Bauvorhaben werden üblicherweise eine Reihe von Test- und Referenzmessungen in Anlehnung an die DIN SPEC 45653 (2017) angeordnet:

(i) Referenzmessung ohne Schallschutzmaßnahme,
(ii) ggf. Testmessung mit dem pfahlnahen Schallschutzsystem,
(iii) ggf. Testmessung mit dem pfahlfernen Schallschutzsystem,
(iv) ggf. Testmessung mit der Kombination aus pfahlnahem und pfahlfernem Schallschutzsystem.

Zu Beginn eines Bauvorhabens werden Referenz- und Testmessungen zumeist für eine projektspezifische Optimierung einzelner Schallschutzsysteme, wie z. B. der Große Blasenschleier, angeordnet bzw. durchgeführt. Hierbei geht es vor allem bei dem Großen Blasenschleier darum, die ggfs. noch nicht omnidirektionale Wirksamkeit durch Nachbohrungen zu verbessern bzw. zu gewährleisten. Die Ergebnisse dieser Testmessungen sind jedoch nicht für die Evaluierung der zu erzielenden Schallminderung eines Schallschutzsystems heranzuziehen. Hierfür müssten i. d. R. die Testmessungen nach sämtlichen Optimierungen an den angewendeten Schallschutzsystemen wiederholt werden.

Die Analyse der Referenz- und Testmessungen ist erforderlich, um einzelne Komponenten von Schallminderungssystemen einschließlich des verwendeten Rammhammers weiter zu entwickeln und zu optimieren. Diese Analyse der spektral aufgelösten, quantitativen Schallminderung von einzelnen Schallminderungssystemen wird pro Bauvorhaben in einem separaten Bericht, dem sogenannten Erfahrungsbericht Schallschutz nach Maßgabe des BSH, zusammengefasst.

Nach aktuellem Kenntnisstand hängt allerdings der Erfolg der Schallschutzmaßnahmen, wie bereits beschrieben, von einer Vielzahl von technisch-konstruktiven und standortspezifischen Faktoren ab. Im Folgenden wird daher die erzielte Schallminderung anhand sämtlicher, vorliegender Daten aus dem MarinEARS[2]-Fachinformationssystem projektübergreifend dargestellt.

Technische Anmerkung: Aus akustischer Sicht sind insbesondere für den Großen Blasenschleier zwei unterschiedliche Testmessungen pro OWP-Bauvorhaben zielführend und notwendig. Die erste Testmessung sollte der projektspezifischen Optimierung des eingesetzten Schallschutzsystems dienen und zu Beginn eines Bauvorhabens erfolgen. Die zweite Testmessung sollte möglichst zum Ende eines Bauvorhabens erfolgen und für die Evaluation des eingesetzten Schallschutzsystems nach DIN SPEC 45653 (2017) verwendet werden.

6.4.2 Erzielte Schallminderung

Für die Berechnung der insgesamt erzielten Schallminderung wurden nicht nur die o. g. Test- und Referenzmessungen pro einzelnem OWP-Bauvorhaben, sondern sämtliche im Bauvorhaben durchgeführten Rammungen mit derselben Schallschutzkonfiguration betrachtet. Mit diesem Schritt wird ein Überblick über die gesamte Leistungsfähigkeit der Schallschutzsysteme einschließlich des verwendeten Rammhammers geschaffen. Zudem zeigt sich durch die Hinzunahme sämtlicher Messdatensätze auch die Reproduzierbarkeit der eingesetzten Schallschutzsysteme.

6.4.2.1. Erzielte Schallminderung mit einem einfachen und doppelten Großen Blasenschleier

In Kapitel 6.3.3 wurde bereits erwähnt, dass bis auf den Großen Blasenschleier die erzielte Schallminderung aller offshore-tauglichen Schallschutzsysteme aufgrund ihrer projektspezifischen Anpassung eine Schallminderung erzielten, die unabhängig von der Wassertiefe im Bereich 20 bis 40 m war. Beim Großen Blasenschleier sind die zugeführte Luftmenge und die vorhandene Wassertiefe entscheidende Parameter für die zu erzielende Schallminderung. Dies basiert auf der Tatsache, dass mit zunehmender Wassertiefe der statische Wasserdruck zunimmt und dies das Volumen der Luftblasen des Blasenschleiers reduziert. In der nachfolgenden Tabelle sind die erzielten Schallminderungen durch einen einfachen und doppelten Großen Blasenschleier in unterschiedlichen Wassertiefen und mit unterschiedlicher Luftmenge zusammengefasst. Die vorherrschende Strömung betrug immer max. 0,75 m/s.

Tabelle 3 zeigt, dass bei gleicher Wassertiefe und gleicher Systemkonfiguration des eingesetzten Großen Blasenschleiers der Unterschied zwischen einem optimierten einfachen und doppelten Großen Blasenschleier ca. 3 dB beträgt. Dies würde mit einer Halbierung der Schallintensität einhergehen. Versuche mit einem dritten und vierten BBC führten zu erhöhten logistischen Herausforderungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von komprimierter Luft (Anzahl der Kompressoren), Düsenschlauchlängen (teilweise Düsenschlauchlängen von >> 1,000 m), Handhabung unter realen Offshore-Bedingungen mit zwei BBC-Begleitschiffen bei kaum nennenswerter Steigerung (~ 1 dB) der Gesamtschallminderung.

Aus Tabelle 3 ist zudem ersichtlich, dass die resultierende Schallminderung durch einen Blasenschleier mit derselben Systemkonfiguration zu größeren Wassertiefen stetig abnimmt. Diesen Effekt kann man mit einer Erhöhung der zugeführten Luftmenge zumindest teilweise kompensieren.

Tabelle 3: *Erzielte breitbandige Schallminderung durch einen optimierten einfachen oder doppelten Großen Blasenschleier mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen hinsichtlich der zugeführten Luftmenge und in unterschiedlichen Wassertiefen. Hinweis: Bei nicht optimierter Systemkonfiguration ergaben sich deutlich geringere Schallminderungen.*

No.	**Schallschutzsystem bzw. Kombination aus Schallschutzsystemen** (verwendete Luftmenge für den (D)BBC; Wassertiefe)	**Durchgangsdämpfung ΔSEL [dB]** (Min. / Mittelwert / Max.)	**Anzahl der Pfähle**
1	Single Big Bubble Curtain – BBC ($> 0{,}3\ m^3/(min \cdot m)$, Wassertiefe < 25 m)	$11 \leq 14 \leq 15$	> 150
2	Double Big Bubble Curtain – DBBC ($> 0{,}3\ m^3/(min \cdot m)$, Wassertiefe < 25 m)	$14 \leq 17 \leq 18$	> 150
3	Single Big Bubble Curtain – BBC ($> 0{,}3\ m^3/(min \cdot m)$, Wassertiefe ~ 30 m)	$8 \leq 11 \leq 14$	< 20
4	Single Big Bubble Curtain – BBC ($> 0{,}3\ m^3/(min \cdot m)$, Wassertiefe ~ 40 m)	$7 \leq 9 \leq 11$	30
5	Double Big Bubble Curtain – DBBC ($> 0{,}3\ m^3/(min \cdot m)$, Wassertiefe ~ 40 m)	$8 \leq 11 \leq 13$	8
6	Double Big Bubble Curtain – DBBC ($> 0{,}4\ m^3/(min \cdot m)$, Wassertiefe ~ 40 m)	$12 \leq 15 \leq 18$	3
7	Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0{,}5\ m^3/(min \cdot m)$, Wassertiefe > 40 m)	~ 15 – 16	1

Technische Anmerkung: Je nach Installationsgeschwindigkeit kann ein doppelter Blasenschleier inkl. notwendiger Kompressoren von einem BBC-Begleitschiff aus ausgelegt, betrieben und eingeholt werden. Für einen dritten und weitere BBC-Systeme müsste zusätzlich mindestens ein Schiff im Baufeld auf engstem Raum operieren. Dies wurde in einem OWP-Bauvorhaben einmalig getestet. Das BSH hat basierend auf diesen Erfahrungen den Einsatz eines dritten und vierten Düsenschlauches und aufgrund der Unverhältnismäßigkeit hinsichtlich Kosten, Nutzen und CO_2-Verbrauch der Kompressoren untersagt.

Die in Tabelle 3 dargestellten Schallminderungen basieren alle auf der Installation von Monopfählen in Wassertiefen von 20 bis 40 m und bei Strömungen < 0,75 m/s, d. h. mit kompensierbaren Verdriftungseffekten.

Technische Anmerkung: Anwendungen eines Großen Blasenschleiers im Ausland bei Strömungen bis zu 2 m/s haben derart starke Verdriftungseffekte gezeigt, dass die resultierende Schallminderung in Strömungsrichtung erheblich (> 5 dB) abnahm; siehe Abbildung 30. Es zeigte sich auch, dass unterschiedliche Größen von Luftblasen unterschiedliche Aufstiegsgeschwindigkeiten haben, was zu einer unterschiedlichen Verweildauer der Luftbläschen im Wasser beim Aufstieg zwischen Meeresboden und Wasseroberfläche führt und somit zu unterschiedlichen Ausprägungen der Verdriftungseffekte. An der Wasseroberfläche fächerte sich der Große Blasenschleier aufgrund der Verdriftungseffekte räumlich sehr stark auf, was zu einer deutlichen Reduzierung des örtlichen Luftanteils im Wasser und damit zu deutlich geringeren Schallminderungen führte.

Technische Anmerkung: Es zeigten sich in den Jahren 2018 und 2019 erste Verschleißerscheinungen an den eingesetzten Düsenschläuchen mit gebohrten Löchern, die bereits in mehreren OWP-Bauvorhaben zum Einsatz gekommen sind. Eine quantitative und qualitative Analyse hinsichtlich der maximalen Einsatzdauer eines Düsenschlauches auf der Grundlage des MarinEARS[2]-Fachinformationssystems ist noch nicht abgeschlossen.

Einfluss der verwendeten Luftmenge auf die spektrale Einfügungsdämpfung eines Großen Blasenschleiers

Abbildung 31 zeigt zum Vergleich die spektrale Durchgangsdämpfung für einen optimierten einfachen Großen Blasenschleier bei Verwendung unterschiedlicher Luftmengen. Es zeigt sich, dass sich durch die Menge der zugeführten Luftmenge die spektrale Form der Durchgangsdämpfung nicht wesentlich ändert, jedoch sich mit höherer Luftmenge die resultierende Durchgangsdämpfung stetig verbessert, insbesondere im Frequenzbereich < 1 kHz.

Die unterschiedliche Abnahme der erzielten Schallminderung durch einen Großen Blasenschleier in Abbildung 31 bei Frequenzen größer 2 kHz resultiert nicht aus der unterschiedlichen, zugeführten Luftmenge, sondern ist dem Einfluss von unterschiedlichen Signal-Rausch-Abständen zwischen dem Rammschall und dem permanenten Hintergrundschall geschuldet. D. h. der permanente Hintergrundschall im OWP-Bauvorhaben begrenzt die Schallminderung im hochfrequenten Bereich; siehe auch Abbildung 33.

Die teilweise ausgeprägte Feinstruktur der dargestellten, spektralen Durchgangsdämpfung ist der Tatsache geschuldet, dass die unterschiedlichen Luftmengen in mehreren unterschiedlichen OWP-Bauvorhaben mit unterschiedlichen, technisch-konstruktiven und standortspezifischen Rahmenbedingungen durchgeführt wurden.

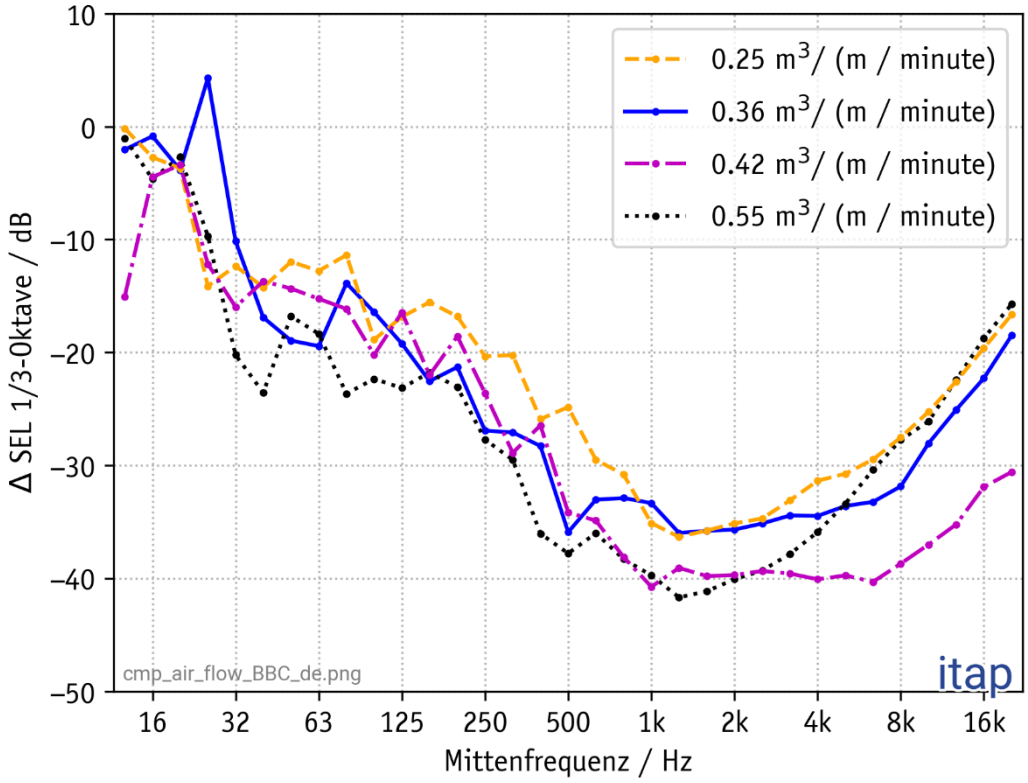


Abbildung 31: *Resultierende gemittelte Schallminderung (Durchgangsdämpfung) aus den Testmessungen nach DIN SPEC 45653 (2017) mit einem doppelten Großen Blasenschleier (DBBC) mit unterschiedlichen, zugeführten Luftmengen.*

6.4.2.2. Erzielte Schallminderung von sekundären Schallschutzsystemen in der deutschen Nordsee

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die erzielte, breitbandige Durchgangsdämpfung der offshore-tauglichen Schallschutzsysteme. Dabei wird nur die jeweils optimierte Systemkonfiguration jedes eingesetzten Schallschutzsystems dargestellt und spiegeln eine Mittelung über sämtliche Anwendungen in unterschiedlichen Bauvorhaben wider. Aufgrund der Mittelungen über mehrere Bauvorhaben mit teilweise nicht vollständig vergleichbaren, standortspezifischen und technisch-konstruktiven Bedingungen und der allgemeinen Messunsicherheit bei Unterwasserschallmessungen ist eine statistische Darstellung von der minimal erzielten Schallminderung, der gemittelten (Median) Schallminderung und der maximal erzielten Schallminderung sinnvoll. Je größer die Unterschiede zwischen der maximal und minimal erzielten Schallminderung eines Schallschutzsystems bzw. einer Schallschutzsystemkonfiguration sind, desto anfälliger ist die Anwendung dieses Schallschutzsystems, dieser Schallschutzsystemkonfiguration bzw. dieser Kombination von Schallschutzsystemen hinsichtlich des Einflusses von standortspezifischen und technisch-konstruktiven Umgebungsbedingungen.

Tabelle 4: *Erzielte Schallminderung von einzelnen, sekundären Schallschutzsystemen und Kombinationen von sekundären Schallschutzsystemen in ihrer jeweils optimierten Systemkonfiguration in Abhängigkeit von unterschiedlichen, technisch-konstruktiven und standortspezifischen Rahmenbedingungen. Sämtliche zugrundliegenden Unterwasserschallmessdaten wurden in der Nordsee mit Strömungen von bis zu 0,75 m/s und einem sandigen Boden erhoben.*

No.	**Schallschutzsystem bzw. Kombination aus Schallschutzsystemen** (verwendete Luftmenge für den (D)BBC; Wassertiefe)	**Durchgangsdämpfung ΔSEL [dB]** (minimal / Mittelwert / maximal)	**Anzahl der Fundamente**
1	IHC-NMS (unterschiedliche Ausführungen) (Wassertiefe bis 40 m)	13 ≤ 15 ≤ 17 dB IHC-NMS8000 15 ≤ 16 ≤ 17 dB	> 450 > 65
2	HSD (Wassertiefe bis 40 m)	10 ≤ 11 ≤ 12 dB	> 340
3	optimierter doppelter BBC*[1] (> 0,5 m^3/(min·m), Wassertiefe ~ 40 m)	15 – 16	1
4	Kombination IHC-NMS + optimierter BBC (> 0,3 m^3/(min·m), Wassertiefe < 25 m)	17 ≤ 19 ≤ 23	> 100
5	Kombination IHC-NMS + optimierter BBC (> 0,4 m^3/(min·m), Wassertiefe ~ 40 m)	17 – 18	> 10
6	Kombination IHC-NMS + optimierter DBBC (> 0,5 m^3/(min·m), Wassertiefe ~ 40 m)	19 ≤ 21 ≤ 22	> 65
7	Kombination HSD + optimierter BBC (> 0,4 m^3/(min·m), Wassertiefe ~ 30 m)	15 ≤ 16 ≤ 20	> 30
8	Kombination HSD + optimierter DBBC (> 0,5 m^3/(min·m), Wassertiefe ~ 40 m)	18 – 19	> 30
9	GABC Skirt-Piles*[2] (Wassertiefe bis ~ 40 m)	~ 2 – 3	< 20
10	GABC Main-Piles*[3] (Wassertiefe bis ~ 30 m)	≤ 7	< 10
11	„Schalloptimiertes“ Rammverfahren (zusätzliche additive, primäre Schallschutzmaßnahme; Kapitel 5.2.2)	~ 2 - 3 dB pro Halbierung der Rammenergie	

*[1] Derzeit die optimale Konfiguration eines doppelten Großen Blasenschleiers bei 40 m Wassertiefe. Eine weitere Erhöhung der zugeführten Luftmenge ist aufgrund des bestehenden Düsenschlauchdurchmessers technisch nur eingeschränkt möglich.

*[2] Bisher wurde ein GABC-System noch nicht als alleiniges Schallschutzsystem beim Bau von Jacket-Fundamenten mit sogenannten Pin-Piles verwendet. Zudem wurden bisher keine Test- oder Referenzmessungen in Anlehnung an die DIN SPEC 45653 (2017) bzw. BSH (2013) erlaubt. Der GABC wurde immer in Kombination mit einem einfachen oder doppelten Großen Blasenschleier durchgeführt. Während der Rammungen wurde jedoch teilweise der GABC kurzzeitig deaktiviert.

Dabei konnte man einen Pegelanstieg in 750 m messen. Diese direkte Methode der Evaluierung birgt jedoch das Risiko einer Unterschätzung des GABC, da zumeist die Zeit nicht vollständig ausreichte, um die gesamte Luft aus dem Spalt zwischen Pfahlführung und zu rammendem Pfahl entweichen zu lassen.

*[3] Bei zwei Konverterplattformen wurden Main-Piles installiert, d. h. die Pfahlführung der Main-Piles deckte die gesamte Wassersäule ab. Einmalig wurde die Luft von unten und einmalig von oben in die Pfahlführung gegeben. In beiden Fällen konnte ein Luft-Wasser-Gemisch realisiert werden. Dieses Schallschutzsystem kam beide Male ohne die Anwendung eines weiteren Großen Blasenschleiers zur Anwendung. Jedoch wurden auch in diesem Fall keine vollständigen Referenzmessungen in Anlehnung an die DIN SPEC 45653 (2017) bzw. BSH (2013) durchgeführt, sondern der GABC nur temporär kurzzeitig ausgeschaltet, so dass eine statistisch valide Evaluierung der zu erwartenden Schallminderung nicht gewährleistet werden kann.

Darüber hinaus wurde in der Analyse nicht der Typ des Impulshammers explizit betrachtet. Insofern dienen die hier dargestellten Werte ausschließlich der Orientierung.

Es sind nur mit einem IHC-NMS oder nur einem optimierten DBBC durchaus Schallminderungen von bis zu 17 dB in Wassertiefen bis 40 m zu erzielen. Durch die Kombination aus einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem lässt sich die resultierende Schallminderung nochmals um mehrere Dezibel verbessern, so dass Schallminderungen von $\geq$ 20 dB zu erzielen sind.

Technische Anmerkung: Es zeigt sich jedoch eindeutig, dass die resultierende Schallminderung von zwei unabhängigen Schallschutzsystemen mit einer jeweiligen Durchgangsdämpfung von z. B. 15 dB nicht zu einer Gesamtschallminderung von 30 dB führt. Hintergrund ist, dass das Eingangsspektrum für das pfahlferne Schallschutzsystem bereits durch den Einsatz des pfahlnahen Schallschutzsystems erheblich gemindert wurde und teilweise kein ausreichender Signal-Rausch-Abstand zwischen Rammschall und Hintergrundschall besteht, insbesondere für Frequenzen ab 500 Hz; siehe Abbildung 33.

Im Gegenzug dazu wirkt sich die Kombination aus einem schalloptimierten Rammverfahren und der Anwendung von Schallschutzsystemen als additive Schallminderung aus. Hintergrund ist, dass die Reduzierung der Rammenergie beim schalloptimierten Rammverfahren prinzipiell als primäres Schallschutzsystem angesehen werden kann, d. h. das schalloptimierte Rammverfahren reduziert die Schallquelle und wirkt sich nicht auf die Durchgangsdämpfung eines sekundären Schallschutzsystems aus.

Bei allen sekundären Schallschutzsystemen bzw. Kombinationen zeigten sich für den Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) grundsätzlich geringfügig höhere Schallminderungen als für den Einzelereignispegel (SEL).

Technische Anmerkung: Jedoch zeigt eine erste statistische Auswertung, dass mit einer deutlich höheren Varianz des Spitzenpegels als mit dem 95 %-Überschreitungspegel des Einzelereignisegels (SEL_{05}) zu rechnen ist.

6.4.2.3. Anwendung von sekundären Schallschutzsystemen in der deutschen Ostsee

Bei einem OWP-Bauvorhaben in der deutschen Ostsee wurde die Kombination aus einem HSD-System und einem optimierten doppelten Großen Blasenschleier (> 0,5 $m^3/(min \cdot m)$) in Wassertiefen zwischen 20 und 40 m als serienmäßiges Schallschutzkonzept angewendet. Die resultierende Schallminderung variierte zwischen 15 und 28 dB. Diese große Varianz in der erzielten Schallminderung ist nicht auf technische Ausfälle eines der beiden eingesetzten Schallschutzsysteme oder auf durchgeführten Optimierungsmaßnahmen am eingesetzten doppelten Großen Blasenschleier (DBBC) zurückzuführen.

Die durchgeführten Referenz- und Testmessungen deuten darauf hin, dass die erzielte Schallminderung durch das pfahlnahe Schallschutzsystem Hydroschall-Dämpfer (HSD) standortabhängig weit unter der üblichen Schallminderung von ca. 10 dB geblieben ist (Ostsee: 5 dB für den Einzelereignispegel und 3 dB für den Spitzenpegel), während der optimierte doppelte Große Blasenschleier (DBBC) eine höhere Schallminderung als in der Nordsee Tabelle 4 erzielte (Ostsee: 18 dB für den Einzelereignispegel bei einer Wassertiefe von 23 m). Ein statistischer Zusammenhang zwischen der erzielten Schallminderung und der Wassertiefe bzw. dem Bodenwiderstand konnte nicht eindeutig hergestellt werden. Für den doppelten Großen Blasenschleier weiß man jedoch, dass Anwendungen bei sehr geringer Strömung einen positiven Einfluss auf die erzielte Schallminderung haben, da keine Verdriftungseffekte der Luftblasen erfolgen.

Beim pfahlnahen HSD-Schallschutzsystem wird vermutet, dass eine Kombination aus nicht schalloptimierter Ballastbox und vorherrschenden variablen Bodenschichtungen (Bodenkopplungen; siehe Kapitel 5.1.2) zu den deutlich variableren, standortspezifischen Schallminderungen als bei Anwendungen in der Nordsee geführt haben. In der deutschen Ostsee findet man zumeist oben aufliegend lockere Sande, gefolgt von Geschiebemergel und Kreide unterschiedlicher Mächtigkeiten. Geschiebemergel und Kreide haben einen deutlich größeren Bodenwiderstand und es wird vermutet, dass durch die Schichtung unterschiedlicher Materialien die Bodenkopplungen deutlich höher ausfallen als in der Nordsee, wo zumeist Ton- und Sandschichtungen unterschiedlicher Dichte und Mächtigkeiten vorkommen; siehe Kapitel 5.1.2.

Technische Anmerkung: Es ist somit zu vermuten, dass jedes pfahlnahe Schallschutzsystem bei der Anwendung in der Ostsee aufgrund der Bodenkopplungen standortspezifisch geringere Schallminderungen aufweisen könnte als in der Nordsee.

Spektrale Schallminderung

Abbildung 32 zeigt die frequenzaufgelösten, gemittelten Differenzspektren der 5 %-Überschreitungspegel des Einzelereignispegels (SEL_{05}), zusammengefasst für jedes sekundäre Schallschutzsystem bzw. Kombination aus Schallschutzsystemen in 1/3-Oktaven (Terzspektren).

Basierend auf der Tatsache, dass für die gemittelten Differenzspektren Messdaten von unterschiedlichen Bauvorhaben und somit unterschiedlichen, standortspezifischen und technisch-konstruktiven Eigenschaften Eingang finden, ist die z. T. vorhandene Feinstruktur der Differenzspektren erklärbar.

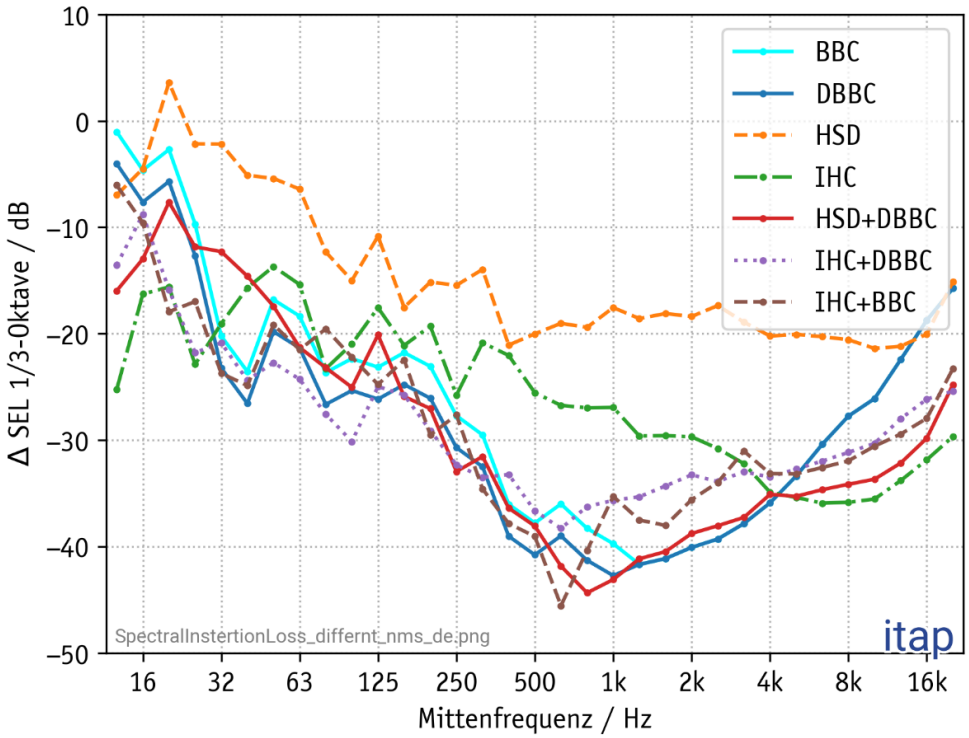


Abbildung 32: *Resultierende Schallminderung (Durchgangsdämpfung) von den eingesetzten, sekundären Schallschutzsystemen – IHC-Noise Mitigation Screen (NMS8000), Hydroschall-Dämpfer (HSD) und optimiertem einfachen/doppelten Großen Blasenschleier (BBC/DBBC), gemittelt über sämtliche Anwendungen innerhalb der dt. AWZ der Nordsee. Hinweis: Die Darstellung der Einfügungsdämpfung weicht von der Vorgabe der DIN SPEC 45653 insofern ab, dass nicht die Differenz aus Referenz- und Testmessung, sondern aus Test- und Referenzmessung dargestellt wird. Negative Werte kennzeichnen somit eine hohe Schallminderung.*

Prinzipiell nimmt die Einfügungsdämpfung (resultierende Schallminderung) für alle offshore-tauglichen Schallschutzsysteme bzw. deren Kombinationen mit steigender Frequenz bis ca. 1 kHz stetig zu. Zu höheren Frequenzen bleibt die erzielte Schallminderung pro Frequenzband entweder konstant oder nimmt geringfügig ab. Dieser Effekt bei Frequenzen > 1 kHz beruht auf den Tatsachen, dass zum einen der Schalleintrag ins Wasser durch Impulsrammungen zu höheren Frequenzen erheblich abfällt

(Abbildung 14 in Kapitel 5.2.1) und sich der Rammschall zum anderen oftmals mit einem optimierten Schallschutzsystem oder mit der Kombination aus zwei sekundären Schallschutzsystemen nicht mehr signifikant (SNR < 10 dB) vom Hintergrundschallpegel abzeichnet; siehe Abbildung 33.

Die unterschiedliche Abnahme der erzielten Schallminderung bei allen dargestellten, sekundären Schallschutzsystemen bei Frequenzen größer 2 kHz resultiert aus unterschiedlichen Signal-Rausch-Abständen zwischen dem Rammschall und dem permanenten Hintergrundschall mit Ausnahme des Hydroschall-Dämpfers. Die unterschiedlichen, sekundären Schallschutzsysteme wurden in mehreren unterschiedlichen OWP-Bauvorhaben mit unterschiedlichen, technisch-konstruktiven und standortspezifischen Rahmenbedingungen durchgeführt.

Basierend auf der Tatsache, dass der maximale Schalleintrag ins Wasser durch eine Impulsrammung abhängig vom Pfahldurchmesser zumeist im Frequenzbereich zwischen 63 und 160 Hz liegt, wird somit die breitbandige Schallminderung durch diesen Frequenzbereich maßgeblich geprägt.

Prinzipiell stellte sich bei den praktischen Anwendungen sämtlicher Schallschutzmaßnahmen heraus, dass durch technische Probleme, Fehlfunktionen oder einer nicht projektspezifischen, optimierten Systemkonfiguration der eingesetzten Schallschutzsysteme erheblich schlechtere Schallminderungen erzielt wurden. Dies gilt insbesondere bei der Anwendung eines Großen Blasenschleiers.

Spektrale Wirksamkeit der eingesetzten technischen Schallschutzsysteme

In Abbildung 33 ist der impulshafte Schalleintrag im Wasser in einer Entfernung von 750 m zu den Gründungsarbeiten an einem OWEA-Fundament mit und ohne Schallschutzmaßnahmen an einem großen Monopfahl zusammengefasst. Zudem wurden während der Rammungen der permanente Hintergrundschall an derselben Messposition sowie die Ruhehörschwelle eines Schweinswals (Kastelein et al., 2009) dargestellt.

Es zeigt sich der typische, spektrale Verlauf eines ungeminderten und geminderten Rammschallereignisses in einer Entfernung von 750 m. Die angewendete Kombination aus Schallschutzsystemen mindert den impulshaltigen Rammschall im tieffrequenten Bereich um 15 bis 20 dB. Die Schallminderung nimmt im hochfrequenten Bereich zu. Allerdings zeigt die Abbildung auch, dass sich der geminderte Rammschall im Bereich von wenigen kHz im Bereich des permanent anwesenden Hintergrundschalls befindet. Dies erklärt, warum die spektrale Durchgangsdämpfung zum einen zu höheren Frequenzen teilweise abnimmt und zum anderen, warum teilweise unterschiedliche Schallminderungen bei unterschiedlichen Schallschutzsystemen bzw. Konfigurationen von Schallschutzsystemen im hochfrequenten Bereich existieren, Abbildung 32. Denn der permanente Hintergrundpegel innerhalb eines OWP-Baufeldes wird maßgeblich durch die Schiffsgeräusche der baubeteiligten Schiffe dominiert. In den deutschen OWP-Bauvorhaben gab es vereinzelt Projekte, bei denen in einem Umkreis von wenigen Kilometern lediglich drei Schiffe anwesend waren: Installationsschiff, BBC-Begleitschiff und Guard

Vessel. Bei anderen Bauvorhaben waren zeitgleich bis zu 20 Schiffe im Einsatz, da parallel Kabelverlegungen, Turbinenaufbauarbeiten und weitere Aktivitäten stattfanden.

Im Rahmen einer aktuellen Studie über kumulative Auswirkungen von Rammarbeiten auf den Bestand des Schweinswals in der deutschen Bucht stellen die Autoren die Hypothese auf, dass Meideverhalten in der Umgebung von Offshore-Baustellen mit dem Schiffsverkehr und sonstigem baustellengebundenen Schall zusammenhängen können (Rose et al., 2019).

Tatsächlich variiert der öffentliche Schiffsverkehr um die OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ basierend auf AIS-Tracks erheblich, was gerade bei Gründungsarbeiten an den Grenzen des Baugebiets erheblichen Einfluss auf den Hintergrundschallpegel und somit auf die Vermessung der spektralen Durchgangsdämpfung des eingesetzten Schallschutzsystems haben kann.

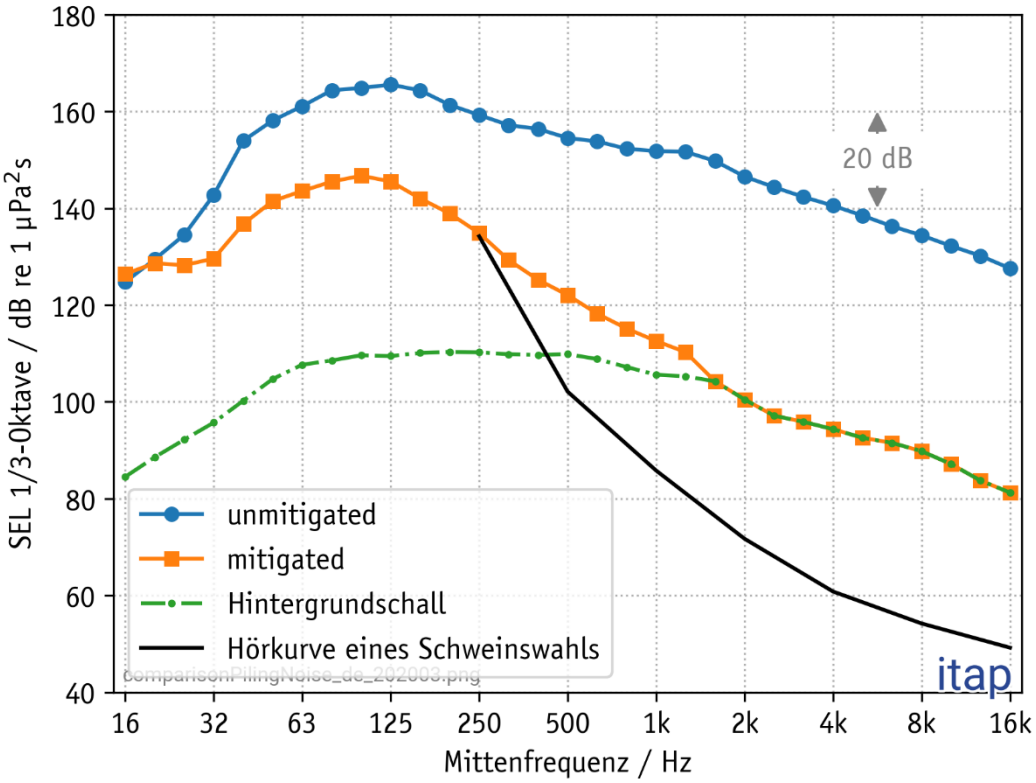


Abbildung 33: *Geminderter und ungeminderter Rammschall, gemessen in einer Entfernung von 750 m zu Gründungsarbeiten an einem großen Monopfahl. Zudem sind der permanente Hintergrundschall, gemessen zwischen den Rammungen mit und ohne Schallschutzmaßnahmen, sowie die Ruhehörschwelle des Schweinswals (Kastelein et al., 2009) dargestellt.*

6.4.3 Zusammenfassung der Erfahrungen mit der Anwendung von sekundären Schallschutzsystemen

Basierend auf den Erfahrungen aus 21 OWP-Bauvorhaben in der deutschen AWZ in der Nord- und Ostsee im MarinEARS[2]-Fachinformationssystem haben sich derzeit lediglich drei sekundäre Schallschutzsysteme im Serieneinsatz als offshore-tauglich, robust und einsatzfähig herausgesellt. Dies sind die beiden pfahlnahen, sekundären Schallschutzsysteme Noise Mitigation Screen (IHC-NMS) und der Hydroschall-Dämpfer (HSD) sowie als pfahlfernes, sekundäres Schallschutzsystem der einfache und doppelte Große Blasenschleier (BBC und DBBC).

Basierend auf der projektübergreifenden Analyse ergaben sich folgende Zusammenhänge:

- Mit dem IHC-NMS oder dem Großen Blasenschleier konnten bisher Schallminderungen von etwa 15 bis 17 dB bis zu einer Wassertiefe bis 40 m erzielt werden.
- Mit einem HSD-System konnten unabhängig von der Wassertiefe Schallminderungen von 10 dB bei optimaler Systemauslegung erzielt werden.
- Die erzielte breitbandige Schallminderung mit einem einfachen oder doppelten Großen Blasenschleier (BBC oder DBBC) ist stark von der technisch-konstruktiven Systemkonfiguration bei gleicher Wassertiefe abhängig. So ist vor allem die Luftmenge und die Konfiguration des eingesetzten Düsenschlauches für die erzielte Schallminderung von entscheidender Bedeutung. Unabhängig davon zeigte sich, dass bei gleicher Systemkonfiguration die erzielte Schallminderung durch einen Großen Blasenschleier mit ansteigender Wassertiefe aufgrund des steigenden statischen Wasserdrucks abnahm. Die resultierende Schallminderung nimmt bei Verwendung eines doppelten anstelle eines einfachen optimierten Großen Blasenschleiers (DBBC statt BBC) um im Mittel 3 dB breitbandig zu.
- Basierend auf den bisherigen Anwendungen mit einem Großen Blasenschleier (BBC und DBBC) konnten technisch-konstruktive Mindestanforderungen für eine optimierte Schallminderung mit diesem Schallschutzsystem abgeleitet werden; siehe Kapitel 6.3.3. Bei Nichteinhaltung dieser Mindestanforderungen nimmt die erzielte Schallminderung durch einen Großen Blasenschleier signifikant ab und kann im ungünstigsten Fall lediglich 2 dB betragen.
- Bei den großen Blasenschleiersystemen und teilweise beim HSD-System stellte sich häufig die Notwendigkeit einer standort- und projektspezifischen Anpassung der Systemkonfiguration vor und während des Baubeginns heraus. Für die projektspezifische Anpassung wurden entsprechende Test- und Referenzmessungen zum Projektstart in Anlehnung an die DIN SPEC 45653 (2017) durchgeführt.
- Unabhängig von der Verwendung eines sekundären Schallschutzsystems kann zusätzlich mit dem primären Schallschutzsystem „Reduzierung der Rammenergie“ (schalloptimiertes Rammverfahren; Kapitel 5.2.2 und 7.4.2) eine Schallminderung um einige Dezibel erreicht werden.
- Die spektrale Schallminderung der eingesetzten, sekundären Schallschutzsysteme ist frequenzabhängig. So zeigte sich, dass

- das HSD-System vorwiegend im tieffrequenten Bereich Schallminderungen erzielte und somit ausschließlich in Kombination mit einem Großen Blasenschleier (BBC oder DBBC) zum Einsatz kam,
- der Große Blasenschleier (BBC und DBBC) sehr hohe Schallminderungen im hochfrequenten Bereich (> 2 kHz) erzielt, die zumeist durch den permanenten Hintergrundschallpegel in diesem Frequenzbereich begrenzt wird; zu tieferen Frequenzen nimmt die erzielte Schallminderung stetig ab,
- das IHC-NMS eine hohe Schallminderung über einen großen Frequenzbereich erzielt.

➢ Mit der Kombination aus einem pfahlnahen und einem pfahlfernen, sekundären Schallschutzsystem ist eine Schallminderung von $\geq$ 20 dB bei einer Wassertiefe von bis zu 40 m möglich. Zu größeren Wassertiefen stellt sich eine resultierende Schallminderung von 20 dB derzeit als eine Herausforderung dar. Umso mehr sind unter solchen Bedingungen ein geeigneter Impulshammer und ein schalloptimiertes Rammverfahren erforderlich.

Technische Anmerkung: Basierend auf den Erfahrungen aller bisherigen deutschen Offshore-Vorhaben hat das BSH Maßnahmen hinsichtlich der Anwendung von Schallschutzmaßnahmen entwickelt, die im Vollzug i. d. R. angeordnet werden, siehe Kapitel 3.3.

7. Diskussion und Ausblick

7.1 Einfluss der spektralen Einfügungsdämpfung auf den wahrnehmbaren Schalleintrag ins Wasser

In Kapitel 6.4 wurden die gemittelten, breitbandigen und spektralen Durchgangsdämpfungen für alle derzeitigen serien- und offshore-tauglichen, sekundären Schallschutzsysteme zusammengefasst; Abbildung 32. Die breitbandigen, einzahligen Durchgangsdämpfungen sind dabei für die Einhaltung des deutschen Lärmschutzwertkriteriums von entscheidender Bedeutung (Tabelle 4), zeigen aber auch, dass durch die statistische Darstellung der erzielten Schallminderungen eine gewisse Unsicherheit in der zu erwartenden Schallminderung aufgrund von standortspezifischen und technisch-konstruktiven Einflussfaktoren einzuplanen ist.

Bei den deutschen Lärmschutzwerten geht es vor allem um die Reduzierung des Schalls an der Quelle und im Nahbereich und um den Schutz der Meeresbewohner (unabhängig von der Spezies) vor einer Verletzung durch impulshaltige Schalleinträge durch Rammarbeiten ins Wasser (Kapitel 3). Die Lärmschutzwerte wurden, wie in Kapitel 3 dargestellt, im Rahmen von F&E-Projekten anhand von Erkenntnissen im Hinblick auf die Schlüsselart (Schweinswal) in deutschen Gewässern der Nord- und Ostseeentwickelt. Für die Bewertung von Störungen, insbesondere durch kumulative Effekte wird dabei der Habitatansatz zugrunde gelegt (Kapitel 3).

In den USA und im Vereinigten Königreich (United Kingdom, UK) beispielsweise werden die technischen Richtlinien von NOAA (National Marine Fisheries Service, 2018) und Southall et al. (2019) mit frequenzgewichteten Parametern individuell für unterschiedliche Spezies angewendet. Hintergrund dieses Vorgehens ist, dass dort eine Vielzahl von marinen Säugetieren vorkommen und nicht alle dieser Spezies durch akustische Reize vertrieben werden können. Ziel dieser Unterwasserschallmodellierung ist die Berechnung von frequenzabhängigen Einwirkradien für unterschiedliche Spezies, basierend auf diversen Literaturdaten hinsichtlich der Vermeidung von (i) Schädigung und (ii) Störung. Bei einem derartigen Vorgehen ist die Anwendung einer breitbandigen Schallminderung pro Schallschutzsystem weder zielführend, noch sachgerecht. Hierfür sind die spektralen Einfügungsdämpfungen zwingend erforderlich, um für unterschiedliche Spezies den Einfluss von Schallschutzsystemen auf ihre Hörfähigkeit und somit auch auf die damit verbundenen Einwirkungsradien frequenzabhängig zu bestimmen. Jedoch ist zu beachten, dass Rammschall zumeist sehr tieffrequent ist (< 1 kHz) und der Schalleintrag im kHz-Bereich zumeist stark abnimmt, im Gegenzug dazu jedoch die Hörfähigkeit vor allem für einige marine Säugetiere, insbesondere dem Schweinswal, im hochfrequenten Bereich stark zunimmt; siehe beispielsweise Abbildung 33.

Grundsätzlich sind bei der Beurteilung von Meideverhalten oder Störungen durch Schalleinträge somit immer der sogenannte Hörschall (engl. sensation level – SL) von entscheidender Bedeutung[20]. Dieser hörbare Schalleintrag ist jedoch nicht nur vom frequenzabhängigen Hörvermögen der einzelnen Spezies abhängig, sondern ebenfalls vom permanent vorhandenen Hintergrundschall (SNR). Die spektrale Form des Rammschalls wird signifikant durch den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen beeinflusst; siehe Abbildung 32. Es kommt hinzu, dass sich sowohl die Bathymetrie (Kapitel 5.1.4), als auch die frequenzabhängige Durchgangsdämpfung auf eine Schallausbreitung über große Distanzen (> 10 km; Abbildung 5 in Kapitel 5.1.5) deutlich bemerkbar machen.

Bei dem Hintergrundschallpegel ist nach neueren Unterwasserschallmessungen nicht nur die Anzahl der Schiffe in und um die Baustellen wesentlich, sondern auch die Art der Antriebe, wie z. B. Schiffe mit dynamischen Positionierungssystemen (DP-System), sowie der Einsatz von Unterwasserkommunikationsmitteln, wie beispielsweise Echoloten oder Sonare, etc.

Erschwerend kommt ggf. noch der Einsatz von akustischen Vergrämungssystemen hinzu, die vor den eigentlichen impulshaften Rammschallereignissen zwingend in deutschen Bauvorhaben zum Einsatz kommen müssen. So konnte in mehreren Studien gezeigt werden, dass die Störwirkung von akustischen Vergrämern, wie z. B. dem Seal Scarer, eine Meidewirkung von Schweinswalen bis in mehrere Kilometer Entfernung vor der eigentlichen Rammung verursachten (Brandt et al., 2016; Rose et al., 2019).

Es ist also zum aktuellen Zeitpunkt nicht auszuschließen, dass die Wirksamkeit von sekundären Schallschutzsystemen abhängig von den betrachteten Spezies durch die Angabe der breitbandigen und spektralen Durchgangsdämpfung aus Kapitel 6.4.2 ggf. hinsichtlich des hörbaren Schalleintrages deutlich unterschätzt wird.

7.2 Herausforderungen für zukünftige Bauvorhaben

Nach derzeitigem Stand der Technik können Monopfähle mit einem Pfahldurchmesser von bis zu 8 m (sogenannte XL-Monopfähle) in der Zone 2 und 3 des Flächenentwicklungsplans der AWZ der deutschen Nordsee (Wassertiefen bis ca. 40 m) auf sandigem Boden unter Einhaltung der deutschen Lärmschutzwerte im Meeresboden mittels Impulsrammverfahren und Anwendung von geeigneten Schallminderungsmaßnahmen installiert werden. Zukünftige Bauvorhaben in deutschen Gewässern werden sich auch in Wassertiefen von > 40 m befinden und/oder größere OWEA werden installiert, so dass ggf. die Durchmesser der zu verwendenden Monopfähle noch ansteigen könnten.

[20] Zur Beurteilung der Störwirkung von Luftschall auf den Menschen wird zumeist die Angabe dB(A) verwendet. Dabei kennzeichnet die spektrale A-Gewichtungsfunktion die invertierte 40 phon Isophone (Kurve gleicher Pegellaustärke) der ISO 226.

Zudem ist bei Bauvorhaben in der Ostsee und im europäischen Ausland innerhalb der Nordsee, z. B. Schottland, mit ggf. komplexeren und härteren Baugründen zu rechnen, so dass eventuell auch höhere Rammenergien zur Überwindung der Bodenwiderstände erforderlich werden.

Diese Aspekte könnten dazu führen, dass sich die Anforderungen an Schallminderung in den nächsten Jahren noch erhöhen können, um die deutschen Lärmschutzwerte verbindlich einhalten zu können. In den nachfolgenden Abschnitten wird der Einfluss der o. g. Faktoren auf die Anforderungen an ein Schallschutzkonzept quantitativ und qualitativ zusammengestellt und diskutiert.

Eine Alternative zu der Verbesserung der Schallminderungsmaßnahmen beim Impulsrammverfahren könnten ggf. jedoch die Verwendung von alternativen, schallarmen Gründungsstrukturen bzw. -verfahren darstellen (Kapitel 7.4.3). Der Einsatz von schallarmen Gründungsstrukturen ist jedoch sehr stark standortabhängig und muss im Einzelfall für jedes Bauvorhaben geprüft werden.

7.2.1 Größere Pfahldurchmesser für Monopfähle

Derzeit in Planung befindliche Bauvorhaben evaluieren die Möglichkeiten, Monopfähle mit deutlich größeren Pfahldurchmessern (sogenannte XXL-Monopiles mit Pfahldurchmessern von $\geq$ 10 m) oder alternativ Jacket-Fundamentstrukturen zu verwenden. Zur Abschätzung des sich ergebenden Schalleintrags durch größere Pfahldurchmesser ist bereits in Abbildung 12 und Abbildung 13 der gemessene, ungeminderte Rammschall in einer Entfernung von 750 m als Funktion des eingesetzten Pfahldurchmessers dargestellt.

Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass mit noch größer werdenden Pfahldurchmessern der Rammschall in einer Entfernung von 750 m zu den Fundamentstandorten weiter ansteigt. Damit werden sich die Anforderungen an die Schallminderung, insbesondere an der technischen Ausführung der einzusetzenden Rammverfahren inkl. der Rammhämmer, ebenfalls erhöhen.

Für zukünftige Bauvorhaben mit größeren Monopfahl-Durchmessern und / oder Wassertiefen sind daher Verbesserungen der Schallminderungsmaßnahmen zwingend erforderlich, um die Lärmschutzwerte auch weiterhin verlässlich einhalten zu können. Dabei scheint nach derzeitigem Kenntnisstand die Reduzierung der Quellstärke (primäre Schallschutzmaßnahme) eine realistischere Option darzustellen (Kapitel 7.4.2), als die Erhöhung der Wirksamkeit bestehender sekundärer, technischer und offshoretauglicher Schallschutzsysteme (Kapitel 7.4.1).

7.2.2 Verwendung von Jacket-Fundamentstrukturen

Die Verwendung von Jacket-Fundamenten in größeren Wassertiefen scheint aus akustischer Sicht keine effektive Alternative für deutsche Gewässer darzustellen, da die kleineren Gründungspfähle aufgrund

von möglichen Kopplungseffekten nicht wesentlich leiser als Monopfähle mit größerem Pfahldurchmesser zu installieren sind (Abbildung 12 und Abbildung 13) und zudem der Einsatz von pfahlnahen, sekundären Schallschutzsystemen derzeit sehr begrenzt ist; Kapitel 6.3. Lediglich ein Großer Blasenschleier in einfacher und doppelter Ausführung in Kombination mit einem Grout Annulus Bubble Curtain wurde bisher im Serieneinsatz verwendet; siehe Kapitel 6.3.5.

7.2.3 Bodenbeschaffenheit und Bathymetrie

Unabhängig von der Fundamentstruktur sind ebenfalls die Bodenbeschaffenheit (Bodenschichtung) und die Bathymetrie bei zukünftigen Bauvorhaben zu berücksichtigen. So existieren derzeit nur sehr wenig Offshore-Erfahrungen bei der Anwendung von pfahlnahen, sekundären Schallminderungsmaßnahmen aus der deutschen AWZ der Ostsee. Der Einfluss von steinigem oder felsigem Untergrund ist derzeit noch schwer einzuschätzen. Es ist aber zu erwarten, dass die Rammenergie zur Überwindung der Bodenwiderstände zunehmen kann. Zudem kann derzeit nicht ausgeschlossen werden, dass sich durch starke Bodenkopplungen (Kapitel 5.1.2) die effektive Wirksamkeit auf den breitbandigen Gesamtpegel durch pfahlnahe Schallschutzsysteme verringern könnte.

7.3 Technische und physikalische Grenzen der heutigen Schallschutzsysteme und ggf. mögliche Weiterentwicklungen

Im Nachfolgenden werden mögliche Verbesserungsmaßnahmen an den bestehenden offshore-tauglichen, sekundären Schallschutzsystemen vorgestellt und diskutiert. Dabei erhebt dieses Kapitel keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

7.3.1 Noise Mitigation Screen - IHC-NMS

Das IHC-NMS hat in der Zeit von 2011 bis 2019 eine enorme technische Entwicklung erfahren. In dem IHC–NMS wurde der Schallschutz bereits in die Installationstechnik integriert. So konnte das System stets die technische Entwicklung in Pfahl-Design und Offshore-Logistik verfolgen und eine effektive Lösung für die Installation und den notwendigen Schallschutz anbieten.

Die Fa. *IHC-IQIP bv* arbeitet daran, die Konfiguration des IHC-NMS stetig zu verbessern. So wird derzeit u. a. darüber nachgedacht, eine Minderung der Bodenkopplung durch einen außenliegenden Blasenschleier um das IHC-NMS zu erreichen. Erste Ideen wurden beispielsweise auf der Schallschutzkonferenz des BfN im Jahr 2018 von *IHC-IQIP bv* in Form eines Vortrages dargestellt (van Vessem & Jung,

2018; Koschinski & Lüdemann, 2019). Nach Angaben von *IHC-IQIP bv* sind diese Ideen jedoch erst in einer sehr frühen Design-Phase und können hier noch nicht im Detail benannt werden.

Es bleibt abzuwarten, ob und welche systematischen Änderungen sich an dem Design des IHC-NMS technisch realisieren lassen und welche Verbesserungen sich dadurch in der resultierenden Schallminderung bei Versuchsanwendungen unter realen Offshore-Bedingungen erzielen lassen.

7.3.2 Hydroschall-Dämpfer – HSD

Das HSD-System hat seit 2014 eine in Abhängigkeit von der konstruktiven Ausführung konstante Minderung von 10 dB_{SEL} erzielt, wobei das Minderungspotenzial stets auf den tiefen Frequenzbereich beschränkt war. Aus akustischer Sicht ist eine weitere Erhöhung der Anzahl der HSD-Elemente zur Erhöhung der resultierenden Schallminderung wünschenswert, jedoch praktisch und technisch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Hintergrund ist, dass die Schallminderung vermutlich in einem logarithmischen Verhältnis mit der Anzahl der HSD-Elemente steht, so dass eine Erhöhung der Schallminderung um wenige Dezibel eine Verdoppelung der HSD-Elemente nach sich ziehen würde. Zudem wird sich mit der Erhöhung der HSD-Elemente auch der Auftrieb massiv erhöhen, so dass die Ballastierung ebenfalls proportional erhöht werden muss, was Auswirkungen auf die Offshore-Logistik mit sich führen wird. Zudem wird die Anforderung an den Stauraum innerhalb der Ballastbox mit zunehmender Anzahl von HSD-Elementen ansteigen.

Prinzipiell bestehen aber mehrere theoretische Möglichkeiten der schrittweisen Verbesserung dieses sekundären Schallschutzsystems (Elmer, 2018):

- alternative HSD-Elemente mit einer höheren Schallminderungswirkung,
- schalloptimiertes Design der Ballastbox,
- Ergänzung bzw. Erweiterung des HSD-Systems zur Minderung der Bodenkopplungen.

Auch hier wurden bereits von der Firma *OffNoise Solutions GmbH* im Rahmen von Vorträgen einige Ideen skizziert, die jedoch auch noch in einer frühen Design-Phase sind und im Detail nicht beschrieben werden können (Elmer, 2018; Koschinski & Lüdemann, 2019).

Es bleibt abzuwarten, ob und welche der potenziellen Verbesserungsmaßnahmen sich technisch realisieren lassen und welche Verbesserungen sich bei großmaßstäblichen Versuchsanordnungen unter realen Offshore-Bedingungen dadurch einstellen.

7.3.3 Großer Blasenschleier – BBC und DBBC

Das aktuelle Design des Großen Blasenschleiers ist nicht allein durch die beiden begleitenden F&E-Vorhaben technisch ausgereizt (Nehls & Bellmann, 2015)[14]. Es gilt auch als nicht realistisch, die zugeführte Luftmenge mit den derzeitigen Düsenschläuchen und Kompressoren nochmals effektiv zu erhöhen, da der Zusammenhang zwischen Luftmenge und erzielter Schallminderung logarithmisch ist; siehe Abbildung 31 in Kapitel 6.4.2

Mögliche technische Weiterentwicklungen des Großen Blasenschleiers können z. B. sein:

- Einsatz anderer Düsenschläuche mit größeren Durchmessern und zeitgleicher signifikanter Erhöhung der Luftmenge. Allerdings wird damit auch der Auftrieb maßgeblich erhöht.
- Der Einsatz von leistungsstärkeren Kompressoren wäre zudem erforderlich, um Düsenschläuche mit größeren Durchmessern ausreichend mit Luft zu versorgen und das Kosten-Nutzen-Verhältnis sowie die CO_2-Bilanz beizubehalten.
- Einsatz von anderen Materialien bei den Düsenschläuchen/Luftauslässen zur Gewährleistung von definierten Löchern hinsichtlich Lochgröße und -form. Erste Tests deuten darauf hin, dass sich mit „kleinen", definierten Düsen anstatt mit gebohrten Löchern sehr kleine reproduzierbare Luftblasen produzieren lassen, die zu einer möglichen Erhöhung der resultierenden Schallminderung beitragen könnten. Erschwerend wird jedoch bei dieser potenziellen Verbesserung hinzukommen, dass kleinere Luftbläschen mit einer geringeren Aufstiegsgeschwindigkeit zur Meeresoberfläche aufsteigen werden und sich somit der Verdriftungseffekt vermutlich deutlich stärker ausprägen könnte.
- Bei Anwendungen von Großen Blasenschleiern bei Wassertiefen von größer 50 m ist ggf. auch der Betriebsdruck von derzeitig 9 bis 10 bar zu erhöhen.

Aus den bisherigen Erfahrungen ist es daher erforderlich, das Blasenschleiersystem im Hinblick auf Düsenschläuche und Kompressoren weiter zu entwickeln. Die Weiterentwicklung des Blasenschleiersystems ist aufgrund der besonderen biologischen Relevanz zum Schutz des hochfrequent kommunizierenden Schweinswals als dringend erforderlich anzusehen.

7.4 Alternative Schallschutzmaßnahmen

7.4.1 Sekundäre Schallschutzsysteme in der Entwicklung

In Koschinski & Lüdemann (2011, 2013 & 2019) sind ein zeitlicher Überblick über verschiedene Möglichkeiten von primären und sekundären Schallschutzmaßnahmen sowie alternative Gründungsstrukturen und -verfahren dokumentiert. Viele vorgestellte neue Konzepte für sekundäre Schallschutzsysteme, wie z. B. der geführte Kleine Blasenschleier oder das HydroNas, befinden sich

aber zumeist noch in einer sehr frühen Design-Phase. Aus diesem Grund wird auf eine Auflistung und Diskussion der möglichen Schallminderung an dieser Stelle verzichtet.

Das AdBm-System, ein weiteres pfahlnahes Schallschutzsystem der Fa. *AdBm Corp.*, befindet sich derzeit in einer Prototypen-Entwicklung mit ersten Anwendungen unter realen Offshore-Bedingungen im europäischen Ausland. Der Wirkungsmechanismus ist prinzipiell vergleichbar zum HSD-System. Es werden sogenannte ortsfeste Resonatoren in der Wassersäule platziert. Hierbei werden keine HSD-Elemente aus verschiedenen Schaumstoffen platziert, sondern es werden luftgefüllte sogenannte Block-Shapes verwendet (ortsfester Blasenschleier mit definierten Luftvolumina), die an der Unterseite offen sind (Wochner et al. 2017a & b).

Das AdBm-System wurde bisher in Deutschland nicht maßstäblich unter Offshore-Bedingungen getestet. In 2019/2020 erfolgte die erste Anwendung eines großskaligen Prototyps bei der Installation von Monopfählen im europäischen Ausland. Der erste Einsatz an fünf Standorten in einem belgischen OWP hat eine Schallminderung von < 10 dB ergeben (Degraer et al., 2019).

7.4.2 Optimierungen der Impulsrammung

Derzeit befinden sich mehrere Konzepte zur Optimierung des Impulsrammverfahrens durch eine Reduzierung der Kraftspitzen und zur Verlängerung der Kraftübertragung in Planung, die im Nachfolgenden kurz zusammengefasst werden sollen.

Blue-Piling: Der Blue-Piling-Hammer arbeitet nicht mit einem metallischen Fallgewicht und einer Hydraulikeinheit zur Anhebung dieser Masse, sondern mit einem großen Wasserbehälter. Am Boden wird mittels einer kleinen Explosion zum einen eine Krafteinleitung auf den Pfahl erzeugt, zum anderen wird ein Teil des Wassers im Behälter nach oben gedrückt. Sobald das Wasser sich wieder in den Ausgangszustand bewegt, findet eine zweite Krafteinleitung auf den Pfahlkopf statt. Der Pfahl wird somit nicht in einzelnen Schlägen in den Meeresboden getrieben, sondern durch einen mehr oder weniger gleichmäßigen Druck auf den Pfahlkopf in den Meeresboden gedrückt. Dieser alternative Impulshammer befindet sich derzeit im Prototypenstadium. Ein erster Offshore-Prototypeneinsatz durch die Firma *Fistuca* erfolgte 2018 und zeigte, dass dieses alternative Rammverfahren prinzipiell technisch realisiert werden kann, aber noch keine Offshore-Tauglichkeit hat (Winkes, 2018, Koschinski & Lüdemann, 2019).

Das Prinzip des Blue-Piling-Hammers wurde nachfolgend von dem Hersteller von Impulsrammhämmern *IHC IQIP bv* übernommen und befindet sich derzeit in der Weiterentwicklung. Der Hersteller sieht vor allem eine mögliche Anwendung bei zukünftigen XL- und XXL-Monopfahl-Installationen (Pfahldurchmesser > 10 m). Eine Praxistauglichkeit dieses neuartigen Hammertyps ist laut Hersteller für die kommenden Jahre angedacht.

Aus akustischer Sicht ist bisher keine valide Aussage über die Höhe der zu erwartenden, primären Schallminderung möglich. Erste überschlägige und theoretische Modellierungen seitens des Herstellers gehen jedoch von einer Schallminderung im ein- bis zweistelligen Dezibel-Bereich aus.

MNRU und PULSE: Derzeit existieren zwei Hersteller von „großen" Impulsrammhämmern, *Menck GmbH* und *IHC-IQIP bv*. Beide Hersteller befinden sich derzeit in der Entwicklung von Zusatzeinheiten, die zwischen dem handelsüblichen Rammhammer und der einzusetzenden Schlaghaube als eine Art „Feder-Dämpfer"-System fungieren. Prinzipiell sollen mit dieser Zusatzeinheit bei gleichbleibender Kraftübertragung ebenfalls Kraftspitzen minimiert und die Impulsdauer maximiert werden. Somit würde eine vergleichbare Kraftübertragung vom Hammer auf den Pfahlkopf erfolgen, aber durch die Reduzierung der Kraftspitze weniger Rammschall produziert werden.

Menck nennt ihre Zusatzeinheit Menck Noise Reduction Unit (MNRU), die Einheit von *IHC-IQ bv* heißt PULSE. Beide Einheiten befinden sich in der Prototypenentwicklung. Erste Testeinsätze sind laut Auskunft der Hersteller in den Jahren 2020 bis 2021 geplant.

7.4.3 Alternative Gründungsverfahren und -strukturen

Eine weitere primäre Schallminderungsmaßnahme könnte die Verwendung von alternativen Gründungsstrukturen und / oder -verfahren darstellen. Hierbei ist jedoch aus akustischer Sicht anzumerken, dass bei den meisten dieser alternativen Gründungsstrukturen und -verfahren kein impulshafter Schalleintrag ins Wasser (MSRL, Deskriptor 11.1), sondern ein kontinuierlicher Schalleintrag (MSRL, Deskriptor 11.2) zu erwarten ist. Hinsichtlich eines kontinuierlichen Schalleintrags ins Wasser bestehen derzeit weder national noch international verbindliche Standards oder Richtwerte. Die Beurteilung von kontinuierlichem Schall auf Meeresbewohner ist derzeit noch in der grundlegenden Erforschung. Eine gute Übersicht über mögliche alternative Gründungsstrukturen und -verfahren ist in Koschinski & Lüdemann (2013; update 2019) zusammengefasst.

Im Nachfolgenden sollen kurz die Erfahrungen von alternativen Gründungsstrukturen und -verfahren, die in Deutschland zum Einsatz kamen, dokumentiert werden.

Suction Bucket: Das Prinzip eines Suction Buckets ist in Abbildung 11 dargestellt. Bei diesem Installationsverfahren wird im Prinzip ein Teil der Fundamentkonstruktion mittels Vakuumpumpen in den Meeresboden eingesogen. Dieses Installationsverfahren gilt als sehr schallarm und i. d. R. wird der Installationsschall nur durch die baubeteiligten Schiffe und ggf. eingesetzten Pumpen verursacht.

Allerdings sind Suction-Bucket-Fundamente nicht für alle Bodentypen geeignet. In Deutschland, aber auch in anderen Ländern wurden bereits Suction-Bucket-Fundamente für OWEAs wie auch Umspannstationen verwendet. Ein erstes sogenanntes Jacket-Suction-Bucket für eine OWEA wurde als Pilotanlage im deutschen OWP *Borkum Riffgrund I* (2014) installiert und die Schallemissionen im Rahmen eines F&E-Vorhabens[21] messtechnisch erfasst (Remmers & Bellmann, 2015). Weitere 20 OWEA-Fundamente (Jacket) wurden zudem in einem Bauvorhaben in der deutschen AWZ der Nordsee installiert (Ørsted, 2019). Zudem wurde eine Umspannstation auf einem Suction Bucket errichtet.

Diese Installationsmethode benötigt aber spezielle Fundamentstrukturen und es muss im Einzelnen geprüft werden, ob diese Installationsmethode für den vorgefundenen Baugrund des jeweiligen Vorhabens geeignet ist.

Schwimmfundament: Schwimmfundamente gelten ebenfalls als schallarme Fundamentstrukturen. Das Prinzip ist in Abbildung 11 dargestellt. Die OWEA wird auf einer schwimmenden Struktur installiert. Diese schwimmende Struktur wird zudem im Meeresboden verankert, um ortsfest zu sein. Die Art und Weise dieser Verankerung ist vielfältig.

In Deutschland wurde diese schallarme Gründungsstruktur bisher noch nicht unter realen Offshore-Bedingungen verwendet und deren Schalleintrag gemessen. Es liegen aber international vereinzelt Erfahrungen mit Prototypen vor (Walia, 2018). Hinsichtlich der Schallemissionen gibt es jedoch nur sehr wenige Messerfahrungen. Zudem ist bei dieser Gründungsstruktur wesentlich, wie die Verankerung im Meeresboden ausgeführt wird. Wenn dafür kleine Fundamentpfähle im Meeresboden mittels Impulsrammschall eingebracht werden müssen, so sind hierfür hinreichende Erfahrungen mit Jacket-Pfählen bekannt. Sollte die Gründung mit alternativen Methoden vollzogen werden, wie beispielsweise mit Gewichtsankern, so bleibt abzuwarten, ob dabei impulshaltiger oder kontinuierlicher Schall ins Wasser eingebracht wird.

Schwerkraftfundament: Das Prinzip eines Schwerkraftfundaments ist in Abbildung 11 dargestellt. Dabei wird eine „große" Fundamentstruktur auf Position verschifft und dann mit Füllmaterial, z. B. Sand, beschwert. Die Gründungsstruktur fungiert dabei als Gewichtsanker.

Bisher wurde eine Jacket-Fundamentstruktur für eine Konverterplattform in der deutschen AWZ der Nordsee installiert. Dabei wird kontinuierlicher Schall von den baubegleitenden Schiffen und von entsprechenden Pumpen zur Verfüllung des Schwerkraftfundamentes mittels z. B. Sand zu erwarten sein.

[21] Verbundvorhaben: Monitoring Suction Bucket Jacket, gefördertes F&E-Vorhaben, FKZ 0325766A, gefördert durch PTJ und BMWi; https://www.isd.uni-hannover.de/435.html.

Zudem liegen einige internationale Erfahrungen vor allem aus der Ostsee bei Wassertiefen von um die 40 m mit Schwerlastfundamenten vor (Halldén, 2018; 4C-Offshore, 2019).

Vibro-Piling: Ein weiteres, möglicherweise schallarmes Gründungsverfahren könnte das Vibrationsrammverfahren (engl. vibro-piling) darstellen. Hierbei werden die Fundamentstrukturen nicht mit einzelnen Rammschlägen, sondern durch kontinuierliche Vibrationen in den Boden gerüttelt. I. d. R. beträgt die Grundfrequenz der Vibrationshämmer < 35 Hz. Schalleinträge vom Vibrationsrammverfahren gelten im Sinne der MSRL als Dauerschalleinträge und sind i. d. R. sehr tieffrequent (< 1.000 Hz).

Für Brückenbau, Spundwandinstallationen (Nearshore) oder im Hafenbau ist diese Installationsmethode zum Stand der Technik zu zählen. Für die Installation von Monopfählen bis auf Endtiefe wurde diese Installationsmethode bisher jedoch nur vereinzelt zu Testzwecken bei OWEAs im Ausland eingesetzt. Hintergrund ist der bisher fehlende Nachweis der dynamischen Pfahl-Belastungsprobe.

In Deutschland erfolgte eine Anwendung dieser Methode bisher nur sehr vereinzelt und nur für die Installation von Gründungspfählen für die ersten Meter Einbindetiefe (Vorinstallation). Messerfahrungen in wenigen hundert Metern Entfernung zeigen, dass sich, abhängig von der Wassertiefe, zumeist die Grundfrequenz nicht vollständig in Flachwasser ausbreiten kann. Die dominantesten Schalleinträge bei einer kraftschlüssigen Kopplung zwischen Vibrationshammer und Pfahlkopf treten bei den ersten Harmonischen[22] auf. Es zeigte sich jedoch auch aus vereinzelten Messungen, dass sich bei einer nicht kraftschlüssigen Kopplung der Schallpegel im Wasser deutlich erhöht und sehr viele hochfrequente Komponenten (> 1 kHz) ins Wasser abgestrahlt werden. Dies geht zumeist auch mit einem erhöhten Luftschallpegel und einem geringen Pfahlvortrieb einher, so dass auf eine kraftschlüssige Ankopplung zwingend zu achten ist.

Es existiert jedoch weder national noch international eine verbindliche Messvorschrift für die Erfassung eines derartigen Dauerschalleintrags. Ebenfalls existieren derzeit keine Beurteilungskriterien für Dauerschallpegel auf die marine Umwelt. Auf diesem Gebiet besteht erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich der Installationsmethode (Machbarkeit im Offshore-Bereich), der Schallabstrahlung und Weiterleitung im Flachwasser, sowie der Auswirkung dieser Dauerschallbelastung auf die Meeresbewohner.

Das Vibro-Piling ist nicht für jedes Vorhaben geeignet und bedarf ebenfalls einer Einzelfallprüfung bzgl. Pfahl-Design, Bodenbeschaffenheit und Standortfestigkeit.

[22] Harmonische kennzeichnen die Vielfachen der Resonanzfrequenz.

8. Literatur

[1] **4C-Offshore (2019)** Global Offshore Renewable Map https://www.4coffshore.com/offshorewind/.

[2] **Bellmann MA, Gündert S & Gerke P (2013)** Offshore Messkampagne 1 (OMK1) für das Projekt BORA im Windpark Bard Offshore 1; technischer Messbericht der itap GmbH Nr. 1924-12-mb vom 14.02.2013. gefördertes Projekt durch BMU und PTJ, FKZ 0325421A/B/C

[3] **Bellmann MA, Gündert S & Remmers P (2015)** Offshore Messkampagne 2 (OMK2) für das Projekt BORA im Windpark Global Tech I; technischer Messbericht der itap GmbH Nr. 2162-13-bel vom 31.03.2015. gefördertes Projekt durch BMU und PTJ, FKZ 0325421A/B/C

[4] **Bellmann MA, Schuckenbrock J, Gündert S, Müller M, Holst H & Remmers P (2015)** Is there a State-of-the-Art to reduce Pile-Driving Noise, proceeding book: Wind Energy and Wildlife Interaction (Presentations from the CWW2015 Conference), Editor Johann Köppel, ISBN978-3-319-51270-9, Springer Verlag, 2015

[5] **Bellmann, MA (2014)** Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Proceeding auf der Internoise 2014, Melbourne Australien.

[6] **Bellmann MA., Kühler R., Matuschek R., Müller M., Betke K., Schuckenbrock J., Gündert S. and Remmers P. (2018)** Noise Mitigation for large foundations (Monopiles L & XL) – Technical options for complying with noise limits, presentation on the BfN Noise Mitigation Conference, November 22nd/23rd 2018 in Berlin.

[7] **Betke, K., Matuschek, M. (2010)** Messungen von Unterwasserschall beim Bau der Windenergieanlagen im Offshore-Testfeld "alpha ventus" - Abschlussbericht zum Monitoring nach StUK 3 in der Bauphase, Oldenburg, pp. 1-48.

[8] **BMU (2013)** Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

[9] **Brandt, M. J., Dragon, A.-C., Diederichs, A., Schubert, A., Kosarev, V., Nehls, G., Wahl, V., Michalik, A., Braasch, A., Hinz, C., Ketzer, C., Todeskino, D., Gauger, M., Laczny, M. & Piper, W. (2016)** Effects of offshore pile driving on harbour porpoise abundance in the German Bight; technischer Abschlussbericht im Auftrag des „Arbeitskreis Schallschutz“ des Offshore Forums Windenergie, erstellt von BioConsult SH GmbH & Co KG, Husum; IBL Umweltplanung GmbH, Oldenburg; Institut für Angewandte Ökosystemforschung GmbH, Hamburg. https://bioconsult-sh.de/de/nachrichten-archiv/der-schlussbericht-zum-forschungsvorhaben-gescha-gesamtstudie-schall-kann-jetzt-heruntergeladen-werden/

[10] **Brandt, M. J., Höschle, C., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R., Witte, S. & Nehls, G. (2011)** Effectiveness of a sealscarer in deterring harbour porpoises (Phocoena phocoena) and its application as a mitigation measure during offshore pile driving. Final report 2011 on behalf of the German Federal Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (FKZ: 0325141) and DONG Energy Bellmann M. A., Kühler R., Matuschek R., Müller M., Betke K., Schuckenbrock J., Gündert S. and Remmers P. (2018) Noise Mitigation for large foundations (Monopiles L & XL) – Technical options for complying with noise limits, presentation on the BfN Noise Mitigation Conference, November 22nd/23rd 2018 in Berlin.

[11] **BSH (2011)** Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen – Aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen. Bericht im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben alpha ventus zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des BSH (StUKplus)“, Förderkennzeichen 0327689A.

[12] **BSH (2013a**) Offshore-Windparks – Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßnahmen. Bericht Nr. M100004/05 erstellt im Rahmen des Forschungsvorhabens „Studie zu Bewertungsansätzen für Unterwasserschallmonitoring im Zusammenhang mit Offshore-Genehmigungsverfahren, Raumordnung und Meeresstrategierahmenrichtlinie“ im Auftrag des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).

[13] **BSH (2013b)** StUK4. Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg.

[14] **Chmelnizkij, A., von Estorff, O., Grabe, J., Heins, E., Heitmann, K., Lippert, S., Lippert, T., Ruhnau, M., Siegl, K., Bohne, T., Grießmann, T., Rolfes, R., Rustemeier, J., Podolski, C., Rabbel, W., Wilken, D. (2016)** Schlussbericht des Verbundprojektes BORA: Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Vorhersage des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten zur Gründung von OWEA, Technische Universität Hamburg-Harburg, Leibniz Universität Hannover, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hamburg, Hannover & Kiel.

[15] **Danish Energy Agency (2016)** Guideline for underwater noise – Installation of impact-driven piles. Energistyrelsen, Center for Energiressourcer, April 2016.

[16] Degraer S, Brabant R, Rumes B & Vigin Laurence (2019) Memoirs in the Marine environment – Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in Belgian Part of the North Sea; published by RBINS, OD Nature, ATECO & MARECO, legal deposit D/2019/0339/7; ISBN: 978-9-0732-4249-4; www.naturalsciences.be

[17] **Diederichs A, Pehlke H, Nehls G, Bellmann M, Gerke P, Oldeland J, Grunau C & Witte S (2014)** Entwicklung und Erprobung des „Großen Blasenschleiers“ zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten (HYDROSCHALL OFF BW II), technischer Abschlussbericht, Förderkennzeichen 0325309 A/B/C.

[18] **DIN 45641 (1990)** Mittelung von Schallpegeln

[19] Din EN 590 (2017) Kraftstoffe – Dieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren.

[20] **DIN SPEC 45653 (2017)** Hochseewindparks - In-situ-Ermittlung der Einfügungsdämpfung schallreduzierender Maßnahmen im Unterwasserbereich

[21] **Elmer, K.H. (2018)** HSD: Effective offshore piling noise mitigation with big monopiles, Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines, Berlin.

[22] **Gündert S (2014)** Empirische Prognosemodelle für Hydroschallimmissionen zum Schutz des Gehörs und der Gesundheit von Meeressäugern. Masterarbeit an der Universität Oldenburg, Institut für Physik, AG Akustik.

[23] **Gündert S, Bellmann MA & Remmers P (2015)** Offshore Messkampagne 3 (OMK3) für das Projekt BORA im Windpark Borkum Riffgrund 01; technischer Messbericht der itap GmbH Nr. 2271-14-bel vom 26.03.2015. gefördertes Projekt durch BMU und PTJ, FKZ 0325421A/B/C

[24] **Halldén, K. (2018)** Gravity base foundation, a noiseless foundation technology, Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines, Berlin.

[25] **Heitmann, K., Ruhnau M., Lippert T., Lippert S. & von Estorff O. (2014)** Rammschallvorhersage zur dritten Offshore-Messkampagne (OMK3) des BORA-Projektes, präsentiert auf dem Schallschutzworkshop des BSH, Hamburg 9. Oktober 2014

[26] **ISO 226 (2003)** Acoustics – Normal equal-loudness-level contours

[27] **ISO 18405 (2017)** Underwater acoustics – Terminology

[28] **ISO 18406 (2017)** Underwater acoustics – Measurement of radiated underwater sound from percussive pile driving

[29] **ISO 8573-1 (2010)** Druckluft – Teil 1: Verunreinigungen und Reinheitsklassen

[30] **Jensen FB, Kuperman WA, Porter MB und Schmidt H (2010): Computational Ocean Acoustics. Springer Verlag, AIP Press**

[31] **Koschinski, S. & Lüdemann, K. (2011)** Stand der Entwicklungen schallminimierender Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen, report on behalf of BfN, Bonn, Germany, pp. 1-83.

[32] **Koschinski, S. & Lüdemann, K. (2013)** Development of Noise Mitigation Measures in Offshore Wind Farm Construction 2013, report on behalf of BfN, Bonn, Germany, pp. 1-97.

[33] **Koschinski, S. & Lüdemann, K. (2019)** Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines -Technical options for complying with noise limits, report on behalf of BfN, Bonn, Germany, pp. 1-42.

[34] **Lucke K., Siebert U., Lepper P. A. & Blanchet M. A. (2009)** Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (Phocoena phocoena) after exposure to seismic airgun stimuli. The Journal of the Acoustical Society of America 125/6, S: 4060–4070. ISSN: 0001-4966

[35] **National Marine Fisheries Service (2018)** Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.

[36] **Nehls G & Bellmann MA (2015)** Weiterentwicklung und Erprobung des „Großen Blasenschleiers“ zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. Gefördert durch PTJ und BMWi, FKZ 0325645A/B/C/D.

[37] **Ørsted (2019)** Our experience with suction bucket jacket foundations, https://orsted.com/-/media/WWW/Docs/Corp/COM/Our-business/Wind-power/Bucket-Jacket_long-version.ashx?la=en&hash=BB12170BD01A84543AF54599146637E5.

[38] **Rose A., Brandt MJ., Vilela R., Diederichs A., Schubert A., Kosarev V., Nehls G., Volkenandt M., Wahl V., Michalik A., Wendeln H., Freund A., Ketzer C., Limmer B., Laczny M., Piper W. (2019)** Effects of noise-mitigated offshore pile driving on harbour porpoise abundance in the German Bight 2014-2016 (Gescha 2) – Assessment of Noise Effects, technischer Abschlussbericht im Auftrag des „Arbeitskreis Schallschutz“ des Offshore Forums Windenergie, erstellt von BioConsult SH GmbH & Co KG, Husum; IBL Umweltplanung GmbH, Oldenburg; Institut für

Angewandte Ökosystemforschung GmbH, Hamburg. https://bwo-offshorewind.de/wp-content/uploads/2019/07/study-on-the-effects-of-noise-mitigated-construction-works-on-the-harbour-porpoise-population-in-the-german-north-sea.pdf

[39] **Southall BL, Finneran JJ, Reichmuth C, Nachtigall PE, Ketten DR, Bowles AE, Ellison WT, Nowacek DP & Tyack PL (2019)** Marine mammal noise exposure criteria: updated scientific recommendations for residual hearing effects. Aquatic Mammals, 45(2), 125-232.

[40] **Steinhagen, U. (2019)** Primärer Schallschutz bei Rammhämmern zur Installation von Offshore-Anlagen / Primary Noise Mitigation of Impulse Hammers for Installation of Offshore Structures, 8th Future Conference: Wind & Maritim 2019, Rostock, 8-9 May 2019.

[41] **Stokes A, Cockrell K, Wilson J, Davis D & Warwick D (2010)** Mitigation of Underwater Pile Driving Noise During; technical report M09PC00019-8; Applied Physical Sciences

[42] **Thiele & Schellstede (1980)** Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik

[43] **Umweltbundesamt (2011)** Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Information Unterwasserlärm, Umweltbundesamt Berlin

[44] **Urick (1983)** Principles of underwater sound, 3rd ed. Pensinsula Publishing, Los Altos

[45] **van Vessem, H., Jung, B. (2018)** Environmental impact optimization by smart solutions: IHC Noise Mitigation System, Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines, Berlin.

[46] **Verfuss T (2014)** Erforschung und Entwicklung von Schallschutzsystemen – eine Erfolgsgeschichte, präsentiert auf dem Schallschutzworkshop des BSH, Hamburg 9. Oktober 2014

[47] **Verfuss, U.K., Sinclair, R.R. & Sparling, C.E. (2019)** A review of noise abatement systems for offshore wind farm construction noise, and the potential for their application in Scottish waters. Scottish Natural Heritage Research Report No. 1070.

[48] **Walia, D. (2018)** Minimal noise emission by floating offshore wind foundations – a tension leg platform as one example, Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines, Berlin.

[49] **Wilke F, Kloske K & Bellmann MA (2012)** ESRa – Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl; technischer Abschlussbericht, Gefördert durch BMU und PTJ, FKZ 0325307

[50] **Winkes, J. (2018)** BLUE piling, Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines, Berlin.

[51] **Wochner, M. S., Lee, K. M., McNeese, A. R. & Wilson, P. S. (2017a)** Noise reduction of pile driving and unexploded ordinance detonations at offshore wind farm installation sites. The Journal of the Acoustical Society of America, 141, 3847-3847.

[52] **Wochner, M. S., Lee, K. M., McNeese, A. R. & Wilson, P. S. (2017b)** Noise Reduction of Unexploded Ordinance Detonations using Tunable Acoustic Resonators. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Institute of Noise Control Engineering, 680-683.

9. Anhang

Anhang 1: Steckbriefe für jedes offshore-taugliche Schallschutzsystem

Noise Mitigation Screen der Firma *IHC-IQIP* (IHC-NMS)

- Rohr-in-Rohr System (Impedanzsprung)
- pfahlnahes Schallschutzsystem
- Anwendungen bis 40 m und Pfahldurchmesser von ≤ 8,0 m
- mehrere hundert Anwendungen offshore

Schallminderung ist unabhängig von:
- Strömung (bis 0,75 m/s)
- Richtung
- Wassertiefe / Bathymetrie

Vorteile:
- Pfahlführung integriert
- Neigungsmessung des Pfahls möglich
- Positionierungstool integriert

Nachteile:
- Größe und Masse (Logistik)
- Bodenkopplungen
- Anwendungen in variablen Wassertiefen?

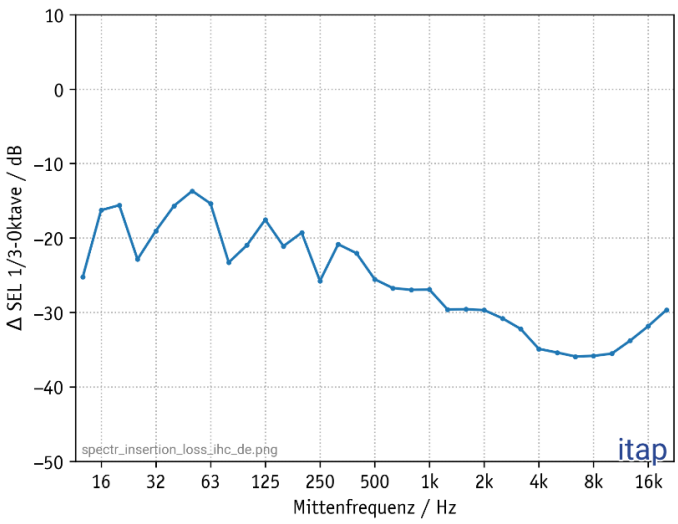
Offshore-taugliches, sekundäres Schallschutzsystem.

Erzielte Schallminderung für Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E)

breitbandige Einfügungsdämpfung ΔSEL [dB]

Minimal	Median	Maximal
13	15	17

spektrale Einfügungsdämpfung



Hydro-Schall-Dämpfer (HSD) der Firma OffNoise Solutions GmbH

Quelle: Offnoise Solution GmbH

- Resonator-System
- pfahlnahes Schallschutzsystem
- Anwendungen bis 40 m und Pfahldurchmesser von ≤ 8,0 m
- mehrere hundert Anwendungen offshore

Schallminderung ist unabhängig von:

- Strömung (bis 0,75 m/s)
- Richtung
- Wassertiefe / Bathymetrie

<u>Vorteile:</u>

- geringe Masse
- Anwendung bei stark unterschiedlichen Wassertiefen möglich

<u>Nachteile:</u>

- Bodenkopplungen
- Hebe- und Absenkvorrichtung derzeit projektspezifische Unikate
- begrenzte Lebensdauer der HSD-Elemente laut Hersteller
- Schallminderung vorwiegend im tieffrequenten Bereich

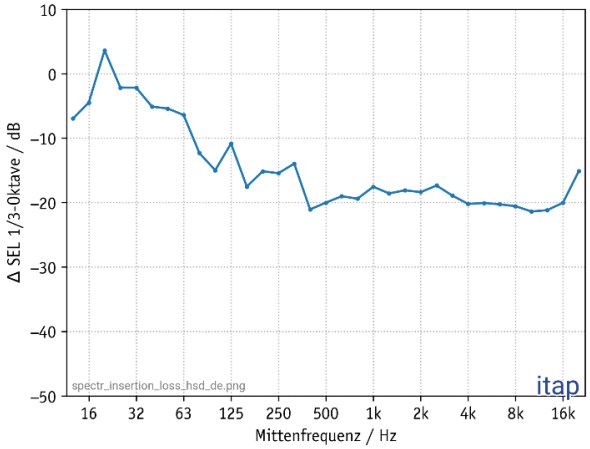
Offshore-taugliches, sekundäres Schallschutzsystem.

Erzielte Schallminderung für Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E)

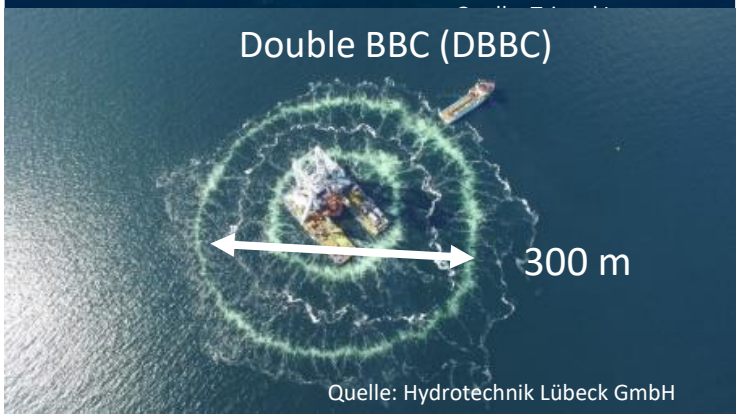
breitbandige Einfügungsdämpfung ΔSEL [dB]

Minimal	Median	Maximal
10	11	12

spektrale Einfügungsdämpfung



Einfacher oder doppelter Großer Blasenschleier (BBC / DBBC)



- Luft-Wassergemisch (Impedanzsprung)
- pfahlfernes Schallschutzsystem
- Anwendungen bis 40 m und Pfahldurchmesser von ≤ 8,0 m
- mehrere hundert Anwendungen offshore

Schallminderung ist abhängig von:

- Luftmenge
- Strömung (bis max. 0,75 m/s)
- Wassertiefe
- Düsenschlauchkonfiguration und -länge
- Anzahl Düsenschläuche
- Offshore-Erfahrung und Wartungszustand

Vorteile:

- unabhängig von Fundamentstruktur
- unabhängig vom Installationsschiff

Nachteile:

- separates Schiff und Kompressoren
- Offshore-Logistik mit Schiffen
- resultierende Schallminderung hängt stark von der Systemkonfiguration ab
- benötigt projektspezifische Optimierung zu Beginn eines jeden Bauvorhabens

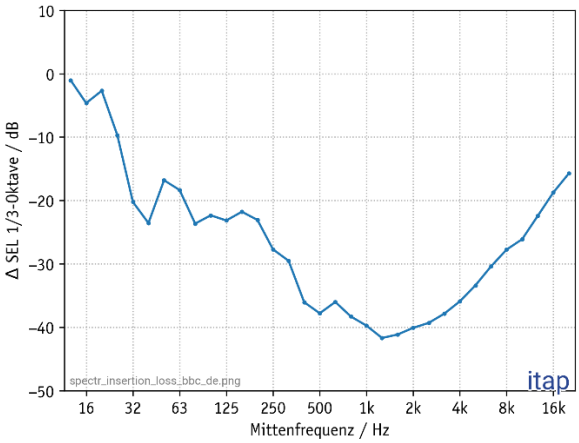
Offshore-taugliches, sekundäres Schallschutzsystem.

Erzielte Schallminderung für Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E)

breitbandige Einfügungsdämpfung

Systemkonfiguration	**ΔSEL [dB]**
Single Big Bubble Curtain - BBC ($> 0{,}3\ m^3/(min*m)$, water depth < 25 m)	11 ≤ 14 ≤ 15
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0{,}3\ m^3/(min*m)$, water depth < 25 m)	14 ≤ 17 ≤ 18
Single Big Bubble Curtain - BBC ($> 0{,}3\ m^3/(min*m)$, water depth ~ 30 m)	8 ≤ 11 ≤ 14
Single Big Bubble Curtain - BBC ($> 0{,}3\ m^3/(min*m)$, water depth ~ 40 m)	7 ≤ 9 ≤ 11
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0{,}3\ m^3/(min*m)$, water depth ~ 40 m)	8 ≤ 11 ≤ 13
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0{,}4\ m^3/(min*m)$, water depth ~ 40 m)	12 ≤ 15 ≤ 18
Double Big Bubble Curtain - DBBC ($> 0{,}5\ m^3/(min*m)$, water depth > 40 m)	~ 15 – 16

spektrale Einfügungsdämpfung optimierter DBBC



Anhang 2: Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei Rammungen in einer Entfernung von einigen 100 m..... 32

Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf eines einzelnen Rammschlags an einem Monopfahl, gemessen in ca. 80 m Entfernung mit mehreren Hydrophonen in unterschiedlicher Höhe zum Meeresboden ohne (links) und mit (rechts) dem Einsatz eines pfahlnahen Schallschutzsystems. Mik1 kennzeichnet das 1. Hydrophon 2 m über dem Meeresboden, alle weiteren Hydrophone befanden sich jeweils in einem vertikalen Abstand von ca. 1,5 m zueinander. Die Wassertiefe in dem Bauvorhaben betrug ca. 30 m..... 42

Abbildung 3: Theoretische untere Grenzfrequenz f_g für eine ungestörte Schallausbreitung im Wasser als Funktion der Wassertiefe für unterschiedliche Bodenschichtungen: blaue Linie resultiert unter Annahme von sandigen Böden und die grau schattierte Fläche skizziert den Einfluss von unterschiedlichen Böden, wie Ton und Geschiebemergel (Urick, 1983; Jensen et al., 2010). 44

Abbildung 4: Gemessenes 1/3-Oktav-Spektrum einer Monopfahl-Installation in zwei unterschiedlichen Wassertiefen (4,5 und 10 m Wassertiefe; sandiger Untergrund). Beide Installationen wurden mit vergleichbaren Schallschutzsystemen durchgeführt. (Quelle: Nicht veröffentlichte Messdaten der itap GmbH aus einem Bauvorhaben außerhalb der dt. AWZ.) 44

Abbildung 5: Verschiedene, prognostizierte Ausbreitungsdämpfungskurven (durchgezogene Linien) für Flachwasser: allgemeine, geometrische Ausbreitungsdämpfung (konservativer Ansatz; 15 log R), semi-empirischer Ansatz definiert in Danish Energy Agency (2016) (DK_log R) und semi-empirischer Ansatz von Thiele und Schellstede (1980) für flaches Gewässer, „glatte" See (IIg) im Vergleich zu bestehenden Offshore-Messdaten (blaue Kreuze). (R – Abstandsverhältnis). 49

Abbildung 6: In verschiedenen Entfernungen gemessene, mittlere 1/3-Oktav-Spektren während der Gründungsphase eines Monopfahls im Impulsrammverfahren. 49

Abbildung 7: Zeitsignal eines einzelnen Rammschlags, gemessen in unterschiedlichen Entfernungen zum Fundament. 50

Abbildung 8: Wassertiefenabhängige Schallgeschwindigkeitsprofile, gemessen in der Ostsee nach einer langanhaltenden Schönwetter-Periode (rechts) und nach vollständiger Durchmischung der Wassersäule (links). Zudem wurden während der Rammarbeiten Unterwasserschallmessungen in drei unterschiedlichen Hydrophonhöhen über Grund (2 m, 10 m und 20 m über Grund bei einer Wassertiefe von 31 m links und 43 m rechts LAT) durchgeführt (rote Linien). 52

Abbildung 9: Statistische Darstellung (Boxplot) des gemessenen Einzelereignispegels (L_E bzw. SEL) mit 16 Hydrophonen von ca. 2 m über Grund bis zur Wasseroberfläche bei einer Impulsrammung eines Monopfahls ohne Einsatz eines technischen Schallschutzsystems in einem Abstand von ca. 80 m zur Rammung innerhalb der dt. AWZ der Nordsee. Mik1 kennzeichnet das Hydrophon 1 in 2 m über Grund; sämtliche weiteren Hydrophone befanden sich jeweils in einem vertikalen Abstand von 1,5 m zueinander; Wassertiefe ~ 30 m. 54

Abbildung 10: Gemitteltes 1/3-Oktav-Spektrum des Einzelereignispegels (SEL_{50}) einer Monopfahl-Gründung mittels Impulsrammverfahren, gemessen in 750 m in zwei unterschiedlichen Messhöhen (2 m und 10 m über Grund bei einer Wassertiefe von größer 20 m). 54

Abbildung 11: Unterschiedliche Fundamentstrukturen für OWEA (Quelle: Stiftung OFFSHORE-WINDENERGIE). 55

Abbildung 12: Gemessene Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL_{05}) bei Gründungsarbeiten an Pfählen unterschiedlicher Fundamentstruktur im Impulsrammverfahren diverser OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers. Sämtliche Rammungen wurden ohne den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen durchgeführt. 57

Abbildung 13: Gemessene Spitzenpegel ($L_{p,pk}$) und breitbandige Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL_{05}) bei Gründungsarbeiten links: von unterschiedlichen Pfahl-Designs mit Pfahldurchmessern von bis zu 4 m und rechts ausschließlich von Monopfählen mit Pfahldurchmessern $\geq$ 5,0 m im Impulsrammverfahren diverser OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers. Sämtliche Rammungen wurden ohne den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen durchgeführt. 57

Abbildung 14: 1/3-Oktav-Spektren von mehreren Impulsrammungen in unterschiedlichen OWP Bauvorhaben, gemessen in 750 m Abstand. Die Rammungen wurden ohne den Einsatz von technischen Schallschutzsystemen durchgeführt. Links: grau schattierte Linien kennzeichnen reale Messdaten von verschiedenen Pfahldurchmessern bis zu einem maximalen Durchmesser von ca. 3,5 m (Pfähle für Jackets); die rote Linie charakterisiert ein gemitteltes, theoretisches Modellspektrum. Rechts: grau schattierte Linien kennzeichnen reale Messdaten von verschiedenen Durchmessern (minimal 6 m, Monopfähle); die rote Linie charakterisiert das gemittelte theoretische Modellspektrum (Median). 58

Abbildung 15: Gemessener Einzelereignispegel (L_E bzw. SEL) in 750 m während einer Monopfahl-Installation als Funktion der Zeit. Die Rammung wurde ohne den Einsatz eines technischen Schallschutzsystems durchgeführt. Zusätzlich ist die verwendete Rammenergie pro Rammschlag (unten) und die erreichte Einbindetiefe (oben) dargestellt. 60

Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels (SEL bzw. L_E) und der verwendeten Rammenergie (grün) während ungeminderter Monopfahl-Installationen in einer Entfernung von 750 m. Links: Der Einfluss der Rammenergie während des Soft-Starts entspricht in etwa einem Pegelanstieg von ca. 2 bis 3 dB pro Verdopplung der Rammenergie. Rechts: Der Einfluss der verwendeten Rammenergie beim Soft-Start ist nicht proportional zur restlichen Rammung. 62

Abbildung 17: 1/3-Oktav-Spektrum des 5-, 50- und 90 %-Überschreitungspegels des Einzelereignispegels (L_E bzw. SEL) in ca. 750 m Entfernung während der Gründungsarbeiten eines Monopfahls im ungeminderten Impulsrammverfahren. Dabei charakterisiert der SEL_{90}-Pegel zumeist den Beginn eines Rammprozesses mit geringen Rammenergien inkl. Soft-Start, der SEL_{50}-Pegel den Rammprozess bis zur Hälfte inkl. ramp-up Prozedur der Rammenergie und der SEL_{05}-Pegel das Ende eines Rammprozesses mit maximaler Rammenergie. 65

Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels (SEL bzw. L_E, blau) und der verwendeten Rammenergie (grün) während Monopfahl-Installationen (Durchmesser 5,5 bis 7,5 m) in einer Entfernung von 750 m mit drei unterschiedlichen Rammhammertypen in der deutschen AWZ der Nordsee. Sämtliche Rammungen wurden ohne Schallschutzsysteme durchgeführt Oben: Pfahldurchmesser 7,5 m mit großem Rammhammer und Einsatz eines schalloptimierten Rammverfahrens (> 3,000 kJ), Mitte: Pfahldurchmesser 5,5 m mit kleinem Rammhammer der älteren Generation (≤ 3,000 kJ) und noch keinem ausgereiften, schalloptimierten Rammverfahren, unten: Pfahldurchmesser 6,5 m mit großem Rammhammer ohne schalloptimiertes Rammverfahren (≥ 3,000 kJ). 67

Abbildung 19: Brutto-Rammdauer pro Monopfahl-Installation mit drei unterschiedlichen Rammhämmern, wie in Abbildung 18 beschrieben. Dabei wurde für jedes Bauvorhaben nur ein Monopfahl ohne Schallschutzmaßnahme (Referenzmessung) installiert. 68

Abbildung 20: Max. eingesetzte Rammenergie pro Monopfahl-Installation mit drei unterschiedlichen Rammhämmern, wie in Abbildung 17 beschrieben. Oben: großer Rammhammer der neuesten Generation mit einem schalloptimierten Rammverfahren, Mitte: kleiner Rammhammer mit einem noch nicht ausgereiften, schalloptimierten Rammverfahren, unten: großer Rammhammer der alten Generation ohne schalloptimiertes Rammverfahren (max. erlaubte Rammenergie seitens des BSH wurde dauerhaft verwendet). 70

Abbildung 21: Schmalbandspektren von Monopfahl-Installationen mit unterschiedlichen Rammhämmern, wie in Abbildung 18 beschrieben. Die Messdaten wurden hinsichtlich der verwendeten Rammenergie normalisiert und zudem wurde kein Schallschutzsystem verwendet. 71

Abbildung 22: Unterschied Main- (links) und Skirt-Piles (rechts) als Gründungspfähle für Jacket-Konstruktionen. (Quelle: ESDEP Lecture note [WG15A] fgg-web.fgg.uni-lj.si). 72

Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels (L_E bzw. SEL) in 750 m Entfernung und der eingesetzten Rammenergie. Beide Rammungen wurden ohne Schallschutzsystem durchgeführt. Oben: Rammung eines Monopfahls bzw. Main-Piles (Rammungen immer oberhalb der Wasseroberfläche); unten: Rammung eines Skirt- bzw. Pin-Piles (Rammung startet oberhalb der Wasseroberfläche und endet unterhalb der Wasseroberfläche; Unterwasser-Rammungen). 73

Abbildung 24: Links: Entwicklung der Pfahldurchmesser für Fundamentstrukturen beim Bau von OWPs in der dt. AWZ der Nord- und Ostsee. Rechts: Gemessener Einzelereignispegel (SEL_{05}) in einer Entfernung von 750 m bei der Anwendung von technischen Schallschutzmaßnahmen; die rote Line markiert den verbindlichen Lärmschutzwert von 160 dB_{SEL} 80

Abbildung 25: Gemessener Einzelereignispegel bzw. Überschreitungspegel (SEL_{05}) in 750 m Entfernung zum jeweiligen Monopfahl für alle Fundamentinstallationen des OWPs Butendiek in der Nordsee mit und ohne Schallschutz. Für dieses Projekt wurden mehrere Messpositionen in mehreren Raumrichtungen und Hydrophonhöhen durchgeführt; für diese Darstellung wurden jeweils nur die höchsten Messwerte in 750 m dargestellt. Dieses Bauvorhaben hat erstmalig zwei unabhängige Schallschutzsysteme (pfahlnahes und pfahlfernes) zum Einsatz gebracht und damit für eine verbindliche Einhaltung des Lärmschutzwertkriteriums in Deutschland geführt (Quelle: MarinEARS Datenbank des BSH). 81

Abbildung 26: Gemessener Einzelereignispegel bzw. Überschreitungspegel (SEL_{05}) in 750 m Entfernung zum jeweiligen Monopfahl für alle Fundamentinstallationen eines OWP-Bauvorhabens in der Nordsee mit einem pfahlnahen und einem pfahlfernen Schallschutzsystem und der Anwendung eines schalloptimierten Rammverfahrens mithilfe eines Echtzeit-Unterwasserschall-Monitorings als aktive Rückkopplung zwischen gemessenem Rammschall in 750 m und eingesetzter Rammenergie. Nicht dargestellt sind die ersten Fundamentstandorte, bei denen umfängliche Test- und Referenzmessungen, d. h. Rammungen mit noch nicht optimierten Schallschutzsystemen und gänzlich ohne Schallschutzmaßnahmen, durchgeführt wurden. 82

Abbildung 27: Noise Mitigation Screen der Fa. IHC IQIP bv. Links oben: technische Konstruktionszeichnung des doppelwandigen Stahlrohres inkl. innenliegender Pfahlführung; rechts oben: IHC-NMS im Offshore-Einsatz (Nahaufnahme); unten: IHC-NMS im Offshore-Einsatz. (Quelle: IHC IQIP bv) 87

Abbildung 28: Links: schematische Zeichnung eines vollständig mobilisierten HSD-Systems, welches unterhalb einem am Installationsschiff befestigten Pfahlführungssystem hängt. Mitte: Netz mit HSD-Elementen; HSD-System während einer Pfahlrammung. (Quelle: OffNoise Solutions GmbH) 89

Abbildung 29: Doppelter Großer Blasenschleier: links: kreisförmige Auslegung aufgrund sehr geringer Strömung; rechts: elliptische Auslegung aufgrund von Strömung (größerer Durchmesser in Strömungsrichtung). (Quelle: Hydrotechnik Lübeck GmbH) 92

Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf des gemessenen Einzelereignispegels an zwei Messpositionen in 750 m in unterschiedlichen Raumrichtungen zur Monopfahl-Installation bei Anwendung eines Großen Blasenschleiers als sekundäres Schallschutzsystem. Oben: Der Unterschied zwischen den beiden Messpositionen resultierte aus Verdriftungseffekten basierend auf einer Strömung > 2 m/s. unten: Der Unterschied zwischen den beiden Messpositionen resultierte durch einen nicht gleichverteilten Lufteintrag ins Wasser. Durch Nachbohrungen des Düsenschlauches konnten diese Unterschiede in unterschiedlichen Richtungen minimiert werden. 98

Abbildung 31: Resultierende gemittelte Schallminderung (Durchgangsdämpfung) aus den Testmessungen nach DIN SPEC 45653 (2017) mit einem doppelten Großen Blasenschleier (DBBC) mit unterschiedlichen, zugeführten Luftmengen. 108

Abbildung 32: Resultierende Schallminderung (Durchgangsdämpfung) von den eingesetzten, sekundären Schallschutzsystemen – IHC-Noise Mitigation Screen (NMS8000), Hydroschall-Dämpfer (HSD) und optimiertem einfachen/doppelten Großen Blasenschleier (BBC/DBBC), gemittelt über sämtliche Anwendungen innerhalb der dt. AWZ der Nordsee. Hinweis: Die Darstellung der Einfügungsdämpfung weicht von der Vorgabe der DIN SPEC 45653 insofern ab, dass nicht die Differenz aus Referenz- und Testmessung, sondern aus Test- und Referenzmessung dargestellt wird. Negative Werte kennzeichnen somit eine hohe Schallminderung 112

Abbildung 33: Geminderter und ungeminderter Rammschall, gemessen in einer Entfernung von 750 m zu Gründungsarbeiten an einem großen Monopfahl. Zudem sind der permanente Hintergrundschall, gemessen zwischen den Rammungen mit und ohne Schallschutzmaßnahmen, sowie die Ruhehörschwelle des Schweinswals (Kastelein et al., 2009) dargestellt. 114

Anhang 3: Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über den derzeitigen Stand des MarinEARS²-Fachinformationssystems. Sämtliche vorhandenen Datensätze standen für die nachfolgenden Analysen zur Verfügung..... 36

Tabelle 2: Übersicht von sekundären, technischen Schallschutzsystemen, die bis 2019 in der deutschen AWZ der Nord- und Ostsee zum Einsatz kamen (Auszug aus Koschinski & Lüdemann 2011, 2013 & 2019). Die drei bewährten und offshore-tauglichen Schallschutzsysteme, die in Deutschland beim Bau von OWPs serienmäßig zum Einsatz kommen, sind markiert. 85

Tabelle 3: Erzielte breitbandige Schallminderung durch einen optimierten einfachen oder doppelten Großen Blasenschleier mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen hinsichtlich der zugeführten Luftmenge und in unterschiedlichen Wassertiefen. Hinweis: Bei nicht optimierter Systemkonfiguration ergaben sich deutlich geringere Schallminderungen. 106

Tabelle 4: Erzielte Schallminderung von einzelnen, sekundären Schallschutzsystemen und Kombinationen von sekundären Schallschutzsystemen in ihrer jeweils optimierten Systemkonfiguration in Abhängigkeit von unterschiedlichen, technisch-konstruktiven und standortspezifischen Rahmenbedingungen. Sämtliche zugrundliegenden Unterwasserschallmessdaten wurden in der Nordsee mit Strömungen von bis zu 0,75 m/s und einem sandigen Boden erhoben. 109