

# Untersuchung und Erprobung von Hydro-Schall-Dämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA



Förderkennzeichen 0325365

## Abschlussbericht



Technische Universität Braunschweig  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik

J. Stahlmann, J. Gattermann, B. Bruns, C. Kuhn, P. Stein

September 2015

Forschungsvorhaben

**Untersuchung und Erprobung von Hydro-Schall-Dämpfern (HSD)  
zur Minderung von Unterwasserschall  
bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA**



Förderkennzeichen 0325365

Laufzeit: 01.09.2011 – 31.10.2014

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik  
Beethovenstr. 51b  
38106 Braunschweig

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie* unter dem Förderkennzeichen 0325365 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann  
Akad. Dir. Dr.-Ing. Jörg Gattermann  
Dipl.-Ing. Benedikt Bruns  
Dipl.-Ing. Christian Kuhn  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Stein

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat die Nutzung der Offshore-Windenergie als zukunftsweisende Technik zur klima- und ressourcenschonenden Energiegewinnung stark zugenommen. Neben den technologischen Herausforderungen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) wurden dabei auch die ökologischen Aspekte intensiv untersucht, um die Belastungen der Meeresumwelt zu erforschen, zu bewerten und zu minimieren. Bei Gründungsarbeiten von OWEA stellt die Schlagrammung mittels hydraulischer Impulshämmer den derzeitigen Stand der Technik dar. Diese führt zu einem starken Schalleintrag in das umgebende Wasser, der wiederum insbesondere den unter Naturschutz stehenden Schweinswal gefährdet. Aus diesem Grund wurden vom Umweltbundesamt Grenzwerte des Unterwasserschalls festgelegt, die bei der Rammung eingehalten werden müssen. Es besteht somit ein großes ökologisches Interesse an der Entwicklung von Schallminderungsverfahren, um diese Grenzwerte einhalten zu können.

Ziel des Vorhabens war es, das patentierte Konzept der Hydro-Schall-Dämpfer (HSD) als neuartiges Schallminderungsverfahren zur Reduzierung der Hydroschallemissionen bei der Rammung von Gründungspfählen für OWEA zu optimieren und zur Marktreife zu entwickeln. Die Offshore-Tauglichkeit sowie das Schallminderungspotential des Verfahrens sollte nachgewiesen und das System im seriellen Einsatz erprobt werden.

Dazu wurde ein umfangreiches Laborprogramm aufgestellt sowie Untersuchungseinrichtungen entworfen und angeschafft. In diesen wurde eine Vielzahl verschiedenster Probekörper aus unterschiedlichen Materialien und verschiedenen Geometrien einzeln und in Kombination auf das jeweilige Schallminderungspotential im Zeit- sowie Frequenzbereich bei unterschiedlichen hydrostatischen Drücken untersucht. Zusätzlich wurde das Auftriebs- und Deformationsverhalten dieser HSD-Elemente unter hydrostatischem Druck bestimmt. Bei der Materialauswahl lag der Fokus auf der Robustheit und Dauerhaftigkeit unter Offshore-Bedingungen. Aufbauend auf den Grundlagenversuchen wurden Massen- und Dichteuntersuchungen durchgeführt, aus denen das Layout von HSD-Netzen abgeleitet werden konnte. Diese wurden in großmaßstäblichen Versuchen im Großen Wellenkanal in Hannover sowie am institutseigenen Versuchstrog eingesetzt, um zusätzlich zum Dämpfungsverhalten einzelner HSD-Körper oder Gruppen von HSD-Elementen auch Rückschlüsse auf das Verhalten ganzer HSD-Netze unter Wasser ziehen zu können. Sämtliche Laboruntersuchungen wurden durch numerische Analysen begleitet.

Im Vorfeld des Vorhabens war ein erster nearshore Prototypentest im Rahmen des *ESRa*-Tests 2011 in geringer Wassertiefe mit geringer Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt worden. Darauf aufbauend sollte der Nachweis der Offshore-Tauglichkeit und Schallminderungswirkung während der Installationsarbeiten des Windparks *London Array* an der englischen Nordseeküste erbracht werden. Dazu wurde in Kooperation mit dem bauausführenden Unternehmen *Aarsleff Bilfinger Berger Joint Venture* (ABJV) im August 2012 ein eigens entwickeltes HSD-System bei der Rammung eines Monopfahles eingesetzt. Das dabei eingesetzte HSD-Netz wurde am Institut erstellt. Während des Offshore-Einsatzes wurden die Auswirkungen des HSD-Systems auf die Unterwasserschallausbreitung vom *Institut für technische und angewandte Physik GmbH* (itap) in Oldenburg in einem umfangreichen Monitoringprogramm in drei Richtungen und drei Entfernungen vermessen. Die Schallminderung betrug in 750 m Entfernung zur Rammlokation sowohl für den Summen- als auch Spitzenpegel im Mittel 9 dB re 1  $\mu$ Pa, wobei keine tiefen-, richtungs- bzw. strömungsabhängigen Einflüsse ermittelt wurden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ermittlung der Schallminderungs-

wirkung nicht an einem Standort durchgeführt wurde, sondern über den Vergleich zwischen dem Testpfahl und einem Referenzpfahl mit ähnlichen Randbedingungen.

Der serielle Einsatz konnte beim Windpark *Amrumbank West* durchgeführt werden, bei dem ein von den Firmen *OffNoise-Solutions GmbH* und *Menck GmbH* designtes HSD-System zusammen mit einem großen Blasenschleier eingesetzt wurde. Die dort eingesetzten Netze haben in 45 Einsätzen die guten Ergebnisse vom Test bei *London Array* konstant bestätigt und übertroffen. Zusammen mit dem Blasenschleier konnten die Grenzwerte für impulsartigen Hydroschall verlässlich eingehalten werden.

Mit dem Forschungsvorhaben *Untersuchung und Erprobung von Hydro-Schall-Dämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA* wurde die Offshore-Tauglichkeit des innovativen Verfahrens der Hydro-Schall-Dämpfer zur Unterwasserschallminderung beim Impulsrammverfahren von Offshore-Gründungspfählen nachgewiesen und das Verfahren zur Marktreife entwickelt. Dies wird durch den vergangenen und aktuellen erfolgreichen seriellen Einsatz bestätigt. Das Verfahren ist leicht auf verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten adaptierbar, die bereits erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Schallminderung zeigen das große Potential des HSD-Systems und sind ein vielversprechender Schritt zur zuverlässigen Einhaltung der geforderten Grenzwerte.

Aufbauend auf den gewonnenen, sehr positiven Erkenntnissen ist in zukünftigen Forschungen zu untersuchen, inwieweit die Ergebnisse unter anspruchsvolleren Randbedingungen wie größeren Wassertiefen oder für andere Arten der Schallanregung wie beim Vibrationsrammverfahren bestätigt werden können. Zum Einsatz des Systems in neuen Projekten können aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen Modifikationen zur Anpassung an die jeweiligen Randbedingungen erfolgen. Diese von der Industrie zu erbringenden Arbeiten stellen anspruchsvolle Ingenieurleistungen, jedoch nicht notwendigerweise Forschungsarbeiten dar.



## Inhaltsverzeichnis

I.	Kurze Darstellung .....	1
I.1	Aufgabenstellung .....	1
I.2	Voraussetzungen für das Vorhaben .....	2
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
I.3.1	Numerische Untersuchungen .....	2
I.3.2	Versuchsprogramm.....	3
I.3.3	Prototypen-Tests.....	5
I.4	Stand der Technik .....	6
I.4.1	Gründung von Offshore-Windenergieanlagen .....	6
I.4.2	Begrenzung des Unterwasserschalls.....	8
I.4.3	Schalltechnische Grundlagen.....	13
I.4.4	Auszug der verwendeten Fachliteratur, Berichte und anderer Quellen .....	17
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	21
I.5.1	Danksagung.....	21
I.5.2	Unterstützende Stellen .....	21
II.	Eingehende Darstellung des Forschungsvorhabens: .....	23
II.1	Labor- und Technikumsversuche.....	23
II.1.1	Messequipment Laborversuche .....	23
II.1.2	Untersuchte Elemente .....	24
II.1.3	Laboruntersuchungen Betonbecken .....	27
II.1.4	Laboruntersuchungen Versuchsrohr .....	31
II.1.5	Laboruntersuchungen Druckkessel.....	36
II.1.6	Untersuchungen im Stahltrog.....	37
II.1.7	Untersuchungen im Großen Wellenkanal (GWK).....	41
II.1.8	Dauerhaftigkeit .....	42
II.1.9	Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse des Laborprogramms .....	45
II.2	Numerische Untersuchungen.....	46
II.3	Offshore-Tests .....	48
II.3.1	Entwicklung und Bau eines Prototyps .....	48
II.3.2	Hafentests und Systemoptimierung .....	53
II.3.3	Technische Durchführung Offshore-Test beim OWP <i>London Array</i> .....	55
II.3.4	Messungen beim OWP <i>London Array</i> .....	63

II.3.5	Vorbereitung eines weiteren Offshore-Tests .....	71
II.3.6	Begleitmessungen zum HSD-Einsatz beim OWP Amrumbank West .....	72

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsstände Außenbereich: Rohr (links) und Stahltrug (rechts) .....	4
Abbildung 2: Versuchsstände Laborhalle: Betonbecken (links) und Druckkessel (rechts).....	5
Abbildung 3: Prinzip des HSD-Systems beim Einsatz an einem Monopfahl mit zusammengefaltetem HSD-System (links), Absenken des Netzes (Mitte) und Netz im Endzustand (rechts) [vgl. Bruns et al., 2014] .....	6
Abbildung 4: Gründungsmöglichkeiten für OWEA [nach Achmus, 2009] .....	7
Abbildung 5: Einwirkzonen einer Schallquelle [nach Elmer et al., 2007] .....	8
Abbildung 6: Rammschallpegel in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers [nach Bellmann, 2014] .....	9
Abbildung 7: Prinzipskizze des großen Blasenschleiers (links) und Einsatz beim OWP <i>Borkum West II</i> (rechts) [Trianel, o.J.].....	10
Abbildung 8: Gemittelte Differenzspektren des SEL durch den Einsatz verschiedenen Blasenschleierkonfigurationen beim OWP <i>Borkum West II</i> normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Pfahl [Diederichs et al., 2014].....	11
Abbildung 9: Zeitsignal (oben) und Frequenzspektrum (unten) eines Rammschlages des Pfahles A45 beim OWP <i>Amrumbank West</i> in 72 m Entfernung zum Pfahl.....	14
Abbildung 10: Filterantworten einzelner Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 4.000 Hz .....	15
Abbildung 11: Terzspektren der bei verschiedenen Projekten eingesetzten Rammgeräte in 750 m Entfernung zum Pfahl .....	16
Abbildung 12: Terzspektren beim <i>ESR<math>\alpha</math></i> -Test (links) [Wilke et al., 2012] mit Referenzmessung (schwarze Linie) und Messung bei Einsatz des HSD-Systems (rote Linie) sowie Differenzspektrum beider Messungen (rechts) .....	16
Abbildung 13: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Elementen im Betonbecken.....	28
Abbildung 14: Terzspektren verschiedener im Betonbecken untersuchter Elemente (links) und Fotos der Versuche (rechts) .....	29
Abbildung 15: Terzspektren von im Betonbecken untersuchten Nudeln einzeln und in Kombination (links) und Fotos der Versuche (rechts).....	30
Abbildung 16: Vergleich der Terzspektren von Elementen mit und ohne Kontakt im Betonbecken (links) und Fotos der Versuche (rechts).....	30
Abbildung 17: Terzspektren der im Betonbecken untersuchten Sylomer <sup>®</sup> -Elemente.....	31
Abbildung 18: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Elementen im Rohr .....	32
Abbildung 19: Impulseinleitung am Druckrohr.....	32
Abbildung 20: Terzspektren von Referenzmessungen im Versuchsrohr ohne HSD-Elemente bei 2 bar an Hydrophon 2 bei 5 Einzelimpulsen (gestrichelt) und gemitteltes Terzspektrum (durchgezogen).....	33

Abbildung 21: Terzspektren von Versuch 36 (2 Ballblasen, 40 cm Umfang) im Versuchsrohr bei 0 bar (oben links), 1 bar (oben rechts), 2 bar (unten links) und 3 bar (unten rechts).....	34
Abbildung 22: Formänderung von Nudeln (oben) und Latex-Ballons (unten) bei steigendem hydrostatischem Druck (von links nach rechts) .....	36
Abbildung 23: Druckabhängigkeit des Volumens von HSD-Elementen.....	37
Abbildung 24: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Netzen im Stahlrog (Vertikalschnitt) .....	37
Abbildung 25: Schuss der Airgun zur Auslösung eines Hydroschall-Impulses im Stahlrog des IGB-TUBS.....	38
Abbildung 26: im Stahlrog untersuchte HSD-Netze mit Latex-Ballons .....	38
Abbildung 27: HSD-Netz mit Latex-Ballons unter Wasser im Stahlrog .....	38
Abbildung 28: im Stahlrog untersuchte HSD-Netze mit kleinen kurzen Nudeln (oben links), kleinen langen Nudeln (oben mittig), großen Nudeln mit Loch (oben rechts), alten Latex-Ballons (unten links), neuen Latex-Ballons (unten mittig) und Schaumstoffbällen (unten rechts) .....	40
Abbildung 29: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Netzen im GWK .....	41
Abbildung 30: im GWK untersuchte Netze mit Latex-Ballons (links), mit Ballblasen (unter Wasser, Mitte) sowie mit Schwimmnudeln (rechts) .....	41
Abbildung 31: Terzanalysen von Nudeln (oben) und Neopolen-Körpern (unten) nach mehreren Druckwechseln.....	43
Abbildung 32: HSD-Element vor (links) und nach (rechts) dem Einsatz beim OWP Amrumbank West .....	44
Abbildung 33: Terzspektren von Untersuchungen im Betonbecken an Nudeln vom <i>ESR<math>\alpha</math></i> -Test (blau) und neuen Elementen (rot) .....	44
Abbildung 34: Freie Tetraedervernetzung und Darstellung der Festhaltung in Längs- (Rohrende) u. Vertikalrichtung .....	46
Abbildung 35: Elementansätze am Längsschnitt durch das Rohr und den Ballon: Ballonhülle als Solid186 (türkis), Übergangsbereich Stahl-Wasser u. Wasser-Ballon als Fluid30 Keyopt 1 (rosa), Wasser als Fluid30 Keyopt 0 (lila), Übergangsbereich Ballon-Luft als Fluid 30 K.....	47
Abbildung 36: Elementansätze am Vertikalschnitt durch den Ballon und das Rohr: Ballonhülle als Solid186 (türkis), Übergangsbereich Stahl-Wasser u. Wasser-Ballon als Fluid30 Keyopt 1 (rosa), Wasser als Fluid30 Keyopt 0 (lila), Übergangsbereich Ballon-Luft als Fluid 30 Keyopt 1 (grun), Luft als Fluid 30 Keyopt 0 (hellblau) .....	47
Abbildung 37: Prinzip Einsatz HSD-System [Bruns, 2011] (links), Konzept des HSD-System mit Ballastbox (rot), Distanzringen (schwarz) und Schwimring (grün) für den Einsatz beim OWP London Array (rechts) .....	48
Abbildung 38: Pile-Gripper zur Führung der Monopfähle (links) und Errichterschiff beim Einfädeln eines Pfahles in den Pile-Gripper (rechts) .....	49



Abbildung 39: Netzlayout Prototyp <i>London Array</i> (links) im Vergleich zum <i>ESRa</i> -Test (rechts).....	52
Abbildung 40: HSD-System beim Zusammenbau im Basishafen Vlissingen/NL.....	53
Abbildung 41: HSD-System nach der Reparatur: Ballastring und Schwimmring mit angeschweißten Distanzringen (links), Führung für Tragseile (Mitte), in Kunststoffrohr eingezogene Tragseile (rechts).....	54
Abbildung 42: HSD-System beim (erfolgreichen) letzten Hafentest: System wird zu Wasser gelassen (links oben), Schwimmring und Teile des Netzes an der Wasseroberfläche (rechts oben), teilweises Absinken des Schwimmringes nach Entlüftung (links unten), HSD-System wird wieder aus dem Hafenbecken gehoben (rechts unten).....	55
Abbildung 43: Standort OWP <i>London Array</i> (links) [LAL, o.J.] sowie der Pfähle der Messkampagne innerhalb des Baufeldes (rechts) [COWI, 2010].....	56
Abbildung 44: Schnitt durch den Baugrund beim OWP <i>London Array</i> mit den drei im Zuge des Offshoretests gerammten Pfählen G10, F05 und F04 [Henke, 2012].....	56
Abbildung 45: Ablauf Pfahlinstallation mit HSD-Einsatz [Bilfinger Berger Maschinentechnik, 2012]	58
Abbildung 46: Verladen des HSD-System an Deck des Installationsschiffes (links), Auflagerpunkte (Mitte), geringer Platzbedarf unterhalb der Monopfähle (rechts).....	59
Abbildung 47: Einsatz des HSD-Systems beim Pfahl F05, chronologisch von links oben nach rechts unten.....	62
Abbildung 48: Messpositionen der <i>itap</i> beim Offshore-Test <i>London Array</i> .....	63
Abbildung 49: Skizze (links) und Foto (rechts) eines Messsystems der Fa. <i>itap</i> [© itap].....	64
Abbildung 50: Entwicklung der Rammenergie und der Schlagzahl bei den Testpfählen des OWP <i>London Array</i> .....	66
Abbildung 51: Terzspektren (links) der Pfähle F04 (Referenz, rot) und F05 (HSD, blau) und Differenzspektrum (rechts) an MP5 (750 m vom Pfahl, 1 m über Grund) [itap, 2013].....	66
Abbildung 52: Differenzspektren der Messpositionen in 750 m (blau) und 1.500 m (grün) vom Pfahl in westlicher (links) und östlicher (rechts) Richtung [itap, 2013].....	67
Abbildung 53: Mediane der Differenzspektren aller Messpositionen in den verschiedenen Himmelsrichtungen (links) und Differenzen der Differenzspektren in 750 m und 1.500 m zum Pfahl in den verschiedenen Himmelsrichtungen (rechts) [itap, 2013].....	67
Abbildung 54: Messpositionen im Nahbereich (links) und Messequipment an Deck der <i>MPI Adventure</i> (rechts).....	69
Abbildung 55: Entwicklung des SEL im Nahbereich (linke Ordinate) und der Rammenergie (rechte Ordinate) über die Rammdauer beim Pfahl F05 mit HSD-Einsatz (von Schlag 500 bis Schlag 2.000).....	69
Abbildung 56: Dämpfungswirkung des HSD-Systems beim Offshore-Test <i>London Array</i> (links) und beim <i>ESRa</i> -Test (rechts) [Wilke et al., 2012] im Frequenzbereich im Nahfeld (ca. 22 m bzw. 6 m Entfernung zum Pfahl).....	70

Abbildung 57: Gegenüberstellung der ermittelten SEL-Verläufe über die Rammung des Pfahles F05 mit Messsystemen der <i>itap</i> (blau) [itap, 2013] und des IGB-TUBS (rot).....	71
Abbildung 58: geplantes Netzlayout <i>DanTysk</i> (links) im Vergleich zu <i>London Array</i> (rechts).....	72
Abbildung 59: Einsatz des HSD-Systems beim OWP Amrumbank West [Bruns et al., 2014].....	73
Abbildung 60: Terzspektren (links) und Differenzspektren (rechts) der Messungen beim OWP <i>Amrumbank West</i> in 750 m Entfernung zum Pfahl [itap, 2014] .....	75
Abbildung 61: Messpositionen im Nahbereich (links) und Handkran zum Herablassen des Messequipments von Bord der <i>MPI Discovery</i> (rechts) .....	76
Abbildung 62: Entwicklung des SEL im Nahbereich (linke Ordinate, Ausfall der Messgeräte an MP2 im zweiten Teil der Rammung) und der Rammenergie (rechte Ordinate) über die Rammdauer beim Pfahl A58 mit HSD-Einsatz (ab etwa Schlag 740) .....	76
Abbildung 63: Entwicklung des SEL im Nahbereich (linke Ordinate) und der Rammenergie (rechte Ordinate) über die Rammdauer beim Pfahl A57 mit Bedienfehler des HSD-Systems (zwischen etwa Schlag 900 und Schlag 2.300) .....	77
Abbildung 64: Dämpfungswirkung des HSD-Systems beim OWP <i>Amrumbank West</i> (links) und beim Offshore-Test <i>London Array</i> (rechts) im Frequenzbereich im Nahfeld (25 m bzw. ca. 20 m Entfernung zum Pfahl) .....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Equipment zur Durchführung der Messungen im Labor .....	23
Tabelle 2: als HSD-Elemente untersuchte Körper .....	25
Tabelle 3: Betonbecken für Laborversuche .....	28
Tabelle 4: Versuchsergebnisse zur Untersuchung von HSD-Elementen im Betonbecken .....	29
Tabelle 5: Übersicht Versuchsergebnisse HSD-Elemente im Druckrohr .....	35
Tabelle 6: Ergebnisse der Versuche mit HSD-Netzen mit Latex-Ballons im Stahltrog.....	39
Tabelle 7: Ergebnisse der Versuche mit HSD-Netzen mit verschiedenen Elementen im Stahltrog ....	40
Tabelle 8: Ergebnisse der Versuche mit HSD-Netzen im GWK, Impulsanregung mittels Airgun .....	42
Tabelle 9: Auftriebsberechnung (Beispiel).....	51
Tabelle 10: Pfahlspezifikationen des Offshore-Tests.....	59
Tabelle 11: zeitlicher Ablauf HSD-Einsatz beim Pfahl F05 .....	61
Tabelle 12: Messpositionen der <i>itap</i> beim Offshore-Test <i>London Array</i> [itap, 2013].....	64
Tabelle 13: Messequipment <i>itap</i> .....	65
Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse bei den Vergleichspfählen F04 und F05 in 750 m und 1.500 m Entfernung zum Pfahl [vgl. itap, 2013] .....	68
Tabelle 15: gemessene Pegel des Hydroschalls im Nahbereich der Vergleichspfähle F04 und F05 ...	70
Tabelle 16: Pfahlspezifikationen der im Rahmen des Vorhabens betrachteten Messungen beim OWP <i>Amrumbank West</i> .....	74
Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schallmessungen in 750 m Entfernung zum Pfahl beim Einsatz des HSD-Systems beim OWP <i>Amrumbank West</i> [vgl. itap, 2014] .....	74
Tabelle 18: gemessene Pegel des Hydroschalls im Nahbereich an MP1 in 25 m Entfernung bei Pfählen A58 und A45 .....	77

## Abkürzungsverzeichnis

ABJV.....	Aarsleff Bilfinger Berger Joint Venture
AWG .....	Amrumbank West (Gesellschaft)
AWZ.....	Ausschließliche Wirtschaftszone
BBMT.....	Bilfinger Berger Maschinentechnik
BBC .....	Big Bubble Curtain (dt.: Großer Blasenschleier)
BMU .....	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWi .....	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAU.....	Christian-Albrechts-Universität (Kiel)
DBBC.....	Double Big Bubble Curtain (dt.: doppelter Großer Blasenschleier)
EPE.....	expandiertes Polyethylen
EPP .....	expandiertes Polypropylen
ESRa.....	Evaluierung von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl
FEM .....	Finite Elemente-Methode
FFT.....	Fast Fourier Transformation (dt.: schnelle Fourier-Transformation)
FKZ.....	Förderkennziffer
FZK.....	Forschungszentrum Küste
GWK .....	Großer Wellenkanal
HSD.....	Hydro-Schall-Dämpfer
IGB-TUBS .....	Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig
itap .....	Institut für Technische und Angewandte Physik GmbH
LAL.....	London Array Ltd. (Limited)
MP .....	Messposition
OWEA .....	Offshore-Windenergieanlage
OWP .....	Offshore-Windpark
PUR.....	Polyurethan
SEL.....	Sound Exposure Level (dt.: Einzelereignispegel)
StUK.....	Standarduntersuchungskonzept
TTS.....	Temporary Threshold Shift (dt.: zeitweilige Hörschwellenverschiebung)



## Symbolverzeichnis

L	[dB]		Pegel
$\Delta L$	[dB]		Pegeldifferenz
$L_E$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]		Einzelereignispegel
$L_{eq}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]		äquivalenter Dauerschallpegel
$L_{peak}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}$ ]		Spitzenpegel
SEL	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]		Einzelereignispegel
$SEL_{05}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]		95%-Perzentil des Einzelereignispegels
$SEL_{50}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]		50%-Perzentil des Einzelereignispegels
$SEL_{90}$	[dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ]		10%-Perzentil des Einzelereignispegels
$p$	[Pa]		Druck
$p_0$	[Pa]	1 $\mu\text{Pa}$	Referenzdruck
$p_{peak}$	[Pa]		Spitzendruck
$c$	[m/s]		Schallgeschwindigkeit
$v$	[m/s]		Schallschnelle
$Z$	[Ns/m <sup>3</sup> ]		akustische Kennimpedanz
$t$	[s]		Zeit
$T$	[s]		Signallänge
$T_0$	[s]	1 s	Bezugszeitdauer
$T_1$	[s]		Zeitpunkt zu Beginn eines Schallereignisses
$T_2$	[s]		Zeitpunkt am Ende eines Schallereignisses
$f$	[Hz]		Frequenz
$n$	[-]		Anzahl an Schallereignissen
$\emptyset$	[m]		Durchmesser eines HSD-Elementes
$D$	[m]		(Außen-)Durchmesser eines HSD-Elementes
$d$	[m]		(Innen-)Durchmesser eines HSD-Elementes
$h$	[m]		Höhe eines HSD-Elementes
$V$	[m <sup>3</sup> ]/[l]		Volumen eines HSD-Elementes
$n$	[-]		Anzahl an HSD-Elementen

## I. Kurze Darstellung

### I.1 Aufgabenstellung

Offene Stahlrohrpfähle stellen derzeit die häufigste Gründungsvariante für OWEA dar. Die Pfähle werden dabei in aller Regel durch Schlagrammen in den Baugrund getrieben, wobei hohe Hydro-schalldrücke emittiert werden. Dies führt bei marinen Lebewesen zu Verhaltensänderungen, Verletzungen oder gar zum Tod. Insbesondere Meeressäuger wie Schweinswale oder Kegelrobben sind zu schützen, weshalb in Deutschland Grenzwerte für Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammungen gelten [Klein et al., 2014]. Diese Grenzwerte können bei der Installation von Gründungspfählen für OWEA mittels Schlagrammung ohne zusätzliche Schallminderungsmaßnahmen nicht eingehalten werden. Daher sind bei derartigen Bauvorhaben zwingend entsprechende Einrichtungen einzusetzen. Bei der Rammung von Monopfählen mit Durchmessern von etwa 6 m in Wassertiefen zwischen 20 m und 30 m reicht ein alleiniges System zur Einhaltung der Grenzwerte des Hydroschalls nicht mehr aus. Für den Einsatz von Monopfahlgründungen größerer Durchmesser (bis 8 m) in größeren Wassertiefen (bis 40 m) gibt es derzeit noch keine abgesicherten Erkenntnisse über die auftretenden Hydroschallpegel. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Schallemissionen weiter ansteigen [Bellmann, 2014]. Zur Einhaltung der Grenzwerte des impulsartigen Hydroschalls sind bei derartigen Projekten Kombinationen mehrerer Schallminderungssysteme einzusetzen.

Alternative Einbringungsmethoden wie das Vibrationsverfahren oder Bohrtechniken werden zwar untersucht, jedoch kann hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Realisierbarkeit noch nicht von einem Stand der Technik gesprochen werden, wie es bei geschlagenen Pfählen der Fall ist. Bei vibrieren Pfählen ist nach den Erfahrungen mit Pfahlgründungen an Land von einer geringeren axialen Tragfähigkeit auszugehen, als bei geschlagenen Pfählen. Wie groß der Unterschied ist und ob er auch auf die laterale Tragfähigkeit, welche insbesondere bei Monopfahlgründungen maßgebend ist, zu übertragen ist, wird derzeit erforscht [Herwig/Gattermann, 2015; Fischer et al., 2013]. Solange jedoch insbesondere auf Seiten der Zertifizierer und der Genehmigungsbehörden Zweifel an der Gleichwertigkeit der Rammverfahren besteht, wird die Schlagrammung gegenüber der Vibrationsrammung bevorzugt werden. Zudem ist die Rammbarkeit mit dem Vibrationsverfahren nur in bestimmten, vorwiegend nicht bindigen Böden gegeben. Der Einsatz von Bohrverfahren befindet sich im Offshore-Bereich bisher noch in der Konzept-Phase [van de Brug et al., 2015]. Neben schallarmen Einbringungsverfahren für Gründungspfähle gibt es weitere schallarme Gründungsformen, welche andere Konzepte zum Lastabtrag in den Baugrund verfolgen und mit anderen Verfahren errichtet werden. Hierzu zählen vor allem Schwergewichtsfundamente und Suction-Bucket-Gründungen. Beide Gründungsformen wurden erfolgreich als Prototypen getestet, konnten jedoch bis jetzt noch keine Marktreife erlangen.

Es ist daher davon auszugehen, dass geschlagene Stahlrohrpfähle für die Gründung von OWEA mittelfristig eine große Rolle spielen werden. Zum Schutz der marinen Fauna bei gleichzeitiger Steigerung der Stromerzeugung durch OWEA sind daher wirksame Schallminderungssysteme (weiter) zu entwickeln.

Ziel des Vorhabens ist die Weiterentwicklung und Optimierung eines neuartigen Schallminderungssystems zur Reduzierung der Hydroschallemissionen bei der Rammung von Gründungspfählen für

OWEA. Die Offshore-Tauglichkeit sowie das Schallminderungspotential des Verfahrens soll nachgewiesen und das System im seriellen Einsatz getestet werden.

Aufbauend auf dem patentierten Konzept der Hydro-Schall-Dämpfer (HSD) wurden Laborversuche zum Vergleich verschiedener Materialien, Geometrien und Anordnungen für HSD-Elemente durchgeführt. Hierfür standen verschiedene Versuchseinrichtungen zur Untersuchung des Dämpfungsverhaltens im Frequenzbereich, des Deformationsverhaltens unter Druck und des Einflusses auf die lineare Ausbreitung von Unterwasserschallwellen zur Verfügung. Zudem wurden mit HSD-Elementen bestückte Netze im Rahmen von Technikumsversuchen untersucht.

Parallel wurde eine technische Lösung entwickelt, die den Einsatz von HSD unter Offshore-Bedingungen während der Rammung von Gründungspfählen für OWEA ermöglicht. Hierbei war neben der Wirksamkeit hinsichtlich der Schallreduzierung vor allem eine möglichst reibungslose Integration in den Bauablauf und eine Minimierung der Risiken für den Fortschritt der Arbeiten anzustreben. Das System wurde nach Konstruktion und Bau eines Prototyps ausgiebigen Hafentests unterzogen und schließlich während der Installation eines Offshore-Gründungspfahles eingesetzt. Die erreichte Dämpfungswirkung wurde durch unabhängige Dritte messtechnisch erfasst.

## I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Die Idee für das Vorhaben wurde am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB-TUBS) unter maßgeblicher Mitarbeit des dort tätigen Lehrbeauftragten für Grundbaudynamik, Herrn Dr. Karl-Heinz Helmer entwickelt, der auch Inhaber der Schutzrechte an HSD ist. Erste Versuche zur Wirkung von HSD wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit am IGB-TUBS durch Branz [2010] durchgeführt. Im August 2011 folgte der Einsatz eines ersten Prototypen unter Nearshore-Bedingungen im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungsvorhabens *Evaluierung von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl* (ESRa, FKZ 0325307) [Wilke et al., 2012].

## I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

### I.3.1 Numerische Untersuchungen

Ziel der numerischen Untersuchungen war neben der Zusammenstellung der physikalischen Grundlagen und Anforderungen die Abbildung des dynamischen Verhaltens der Hydroschalldämpfer mit Hilfe von angepassten Finite-Element-Modellen. Die Theorie und die Grundgleichungen von Luftblasen im Wasser bzw. Blasenschleiern waren um die Wirkung der Blasenhülle und spezieller Füllmaterialien der einzelnen Ballons eines Hydroschalldämpfersystems einschließlich der Materialdämpfung von Hüll- und Füllmaterial zu erweitern. Gegenüber den Luftblasen eines Blasenschleiers hängt die Eigenfrequenz eines Hydroschalldämpfers nicht mehr von der Größe der Blase, sondern u. a. vom Innendruck, der Steifigkeit des Füllmaterials und der Steifigkeit bzw. Dicke der Außenhülle ab.

Die numerischen Untersuchungen wurden nach der Methode der Finiten Elemente (FEM) mithilfe der Software ANSYS durchgeführt. Näheres hierzu findet sich in Abschnitt II.2

### I.3.2 Versuchsprogramm

Für die Untersuchung von HSD-Elementen standen am IGB-TUBS verschiedene Versuchseinrichtungen zur Verfügung bzw. wurden entwickelt. In diesen wurde das dynamische Verhalten von HSD-Elementen einzeln und in Gruppen sowie von kleineren HSD-Netzen untersucht. Dabei wurden u.a. die Dämpfungswirkung unter verschiedenen Randbedingungen (Druck, Anregung), die Kompressibilität unter Druck und die Dauerhaftigkeit ermittelt. Da es für derartige Untersuchungen keine festgelegten Versuchsaufbauten gibt, waren die Versuche durch Variation verschiedener Parameter vor Beginn des eigentlichen Laborprogramms eigens zu entwickeln. Im Einzelnen kamen folgende Versuchseinrichtungen zum Einsatz:

#### Versuchrohr (s. Abbildung 1, links)

- Abmessungen: 40 m Länge, 60 cm Durchmesser
- Druckverhältnisse ähnlich Offshore-Bedingungen (bis ca. 3 bar / 30 mWS)
- Generierung von Stoßimpulsen (Pendelschlag)
- lineare Ausbreitung des Impulses, keine (oder sehr späte) Reflektionen
- Einbau eines oder mehrerer HSD-Elemente
- Hydrophone vor und hinter HSD-Elementen zur Bestimmung der Schallminderung
- Beobachtung der HSD-Elemente eingeschränkt möglich

Im Versuchrohr wurde der Einfluss einzelner oder mehrerer HSD-Elemente auf impulsartige Schallereignisse untersucht. Durch Variationen des hydrostatischen Druckes im Rohr konnte der Einfluss der Wassertiefe unter Offshore-Bedingungen simuliert werden. Mittels Frequenzanalysen konnte die frequenzabhängige Dämpfung verschiedener Elemente unter verschiedenen hydrostatischen Drücken untersucht werden.

Es konnten Aussagen über den Einfluss der Eigenfrequenzen der Elemente sowie deren Pegelminderungen abgeleitet werden. Die Untersuchungen erlaubten den relativen Vergleich der Schallminderung für die einzelnen HSD-Elemente. Die Ergebnisse sind auf die zu erwartenden Dämpfungswirkungen beim Offshore-Einsatz jedoch nur bedingt quantitativ übertragbar. Durchführung und Ergebnisse der Versuche im Rohr sind in Abschnitt II.1.4 zu finden.

#### Stahltrog (s. Abbildung 1, rechts)

- Abmessungen: 20 m Länge, 2 m Breite, 2 m Höhe
- Generierung von Stoßimpulsen (Airgun)
- Einbau von HSD-Netzen
- Hydrophone an verschiedenen Stellen

Im Stahltrog wurden kleinere Netze (ca. 2 m x 2 m) mit unterschiedlichen HSD-Elementen auf ihre Dämpfungswirkung impulsartiger Schallereignisse untersucht. Aufgrund der vergleichsweise geringen Größe des Versuchsstandes und der Reflexionen an der Trogwand ist auch hier ein relativer Vergleich der HSD-Elemente möglich, eine Übertragbarkeit auf in situ Verhältnisse jedoch nur bedingt. Näheres findet sich in Abschnitt II.1.6.



### Großer Wellenkanal (GWK)

- Abmessungen: 300 m Länge, 5 m Breite, 7 m Tiefe
- Generierung von Stoßimpulsen (Airgun) und Sweep-Anregung (Lautsprecher)
- Einbau von HSD-Netzen
- Hydrophone an verschiedenen Stellen

Im Großen Wellenkanal (GWK) am Forschungszentrum Küste (FZK, Gemeinsame Zentrale Einrichtung der Leibniz Universität Hannover und der Technischen Universität Braunschweig) wurden ähnlich wie im Stahlrog HSD-Netze untersucht. Aufgrund der größeren Abmessungen des GWK im Vergleich zum Stahlrog konnten realitätsnähere Randbedingungen geschaffen werden. Versuchsbeschreibung und Ergebnisse finden sich in Abschnitt II.1.7.



**Abbildung 1: Versuchsstände Außenbereich: Rohr (links) und Stahlrog (rechts)**

### Betonbecken (s. Abbildung 2, links)

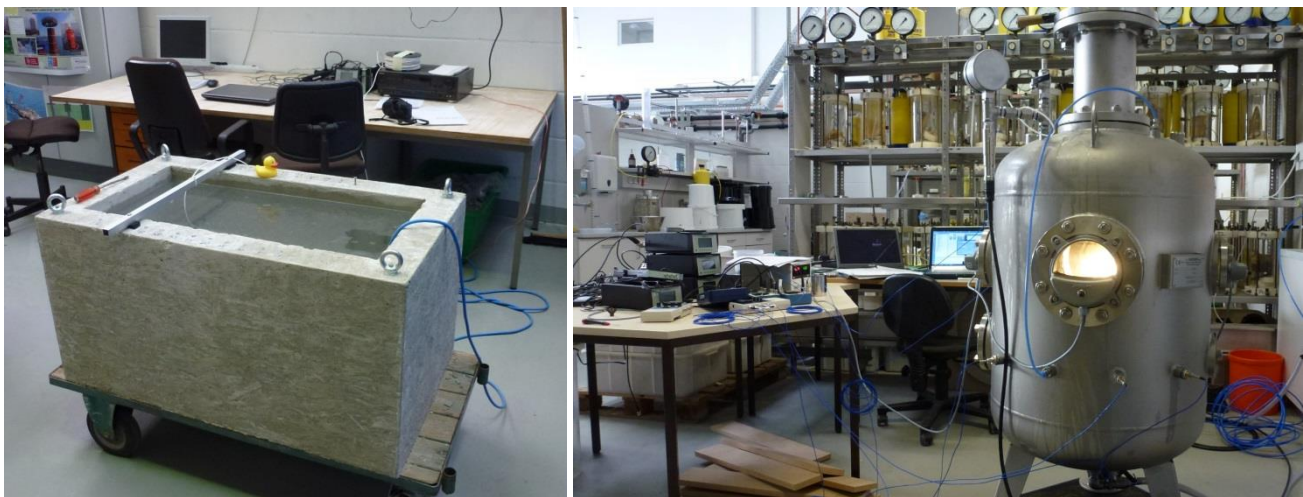
- Fassungsvermögen: 150 l
- Generierung von Sweeps über Frequenzbereich ähnlich Offshore-Rammungen (10 Hz - 4.000 Hz)
- komplexes Wellenbild aufgrund von Reflektionen an massiger Trogwandung
- Einbau mehrerer HSD-Elemente
- Hydrophone hinter den HSD-Elementen

Verschiedene Elemente wurden im Betonbecken durch harmonische Schwingungen in einem für Offshore-Rammungen üblichen Frequenzbereich akustisch angeregt. Über die Messung des Hydro-schalls im Trog konnte auf die Reaktion der Elemente und deren Eigenfrequenz geschlossen werden. Dies stellte eine wichtige Grundlage für die Auswahl von Elementen bei der Festlegung des Layouts für HSD-Netze dar. Nähere Informationen zu den Versuchen im Betonbecken finden sich in Abschnitt II.1.3.

Druckkessel (s. Abbildung 2, rechts)

- Druckverhältnisse wie unter Offshore-Bedingungen zur Simulation der Wassertiefe
- Erzeugung hoher hydrostatischer Drücke über längeren Zeitraum zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit
- zyklischer Auf- und Abbau der Druckbeanspruchung
- Beobachtung der HSD-Elemente unter Druckbeaufschlagung möglich

Der Druckkessel diente der Untersuchung des Einflusses des hydrostatischen Druckes auf HSD-Elemente. Der Einfluss des Druckes auf die Geometrie der Elemente (Kompression) ist von großer Bedeutung für die Bemessung der Ballastierung von Netzen bei Offshore-Einsätzen. Über wiederkehrende und langanhaltende Beaufschlagung mit hydrostatischem Druck wurde die Dauerhaftigkeit der Elemente analog zum mehrmaligen Einsatz bei einer Vielzahl von Pfahlrammungen überprüft. Die Untersuchungen im Druckkessel sowie die daraus abgeleiteten Ergebnisse sind in Abschnitt II.1.5 beschrieben.



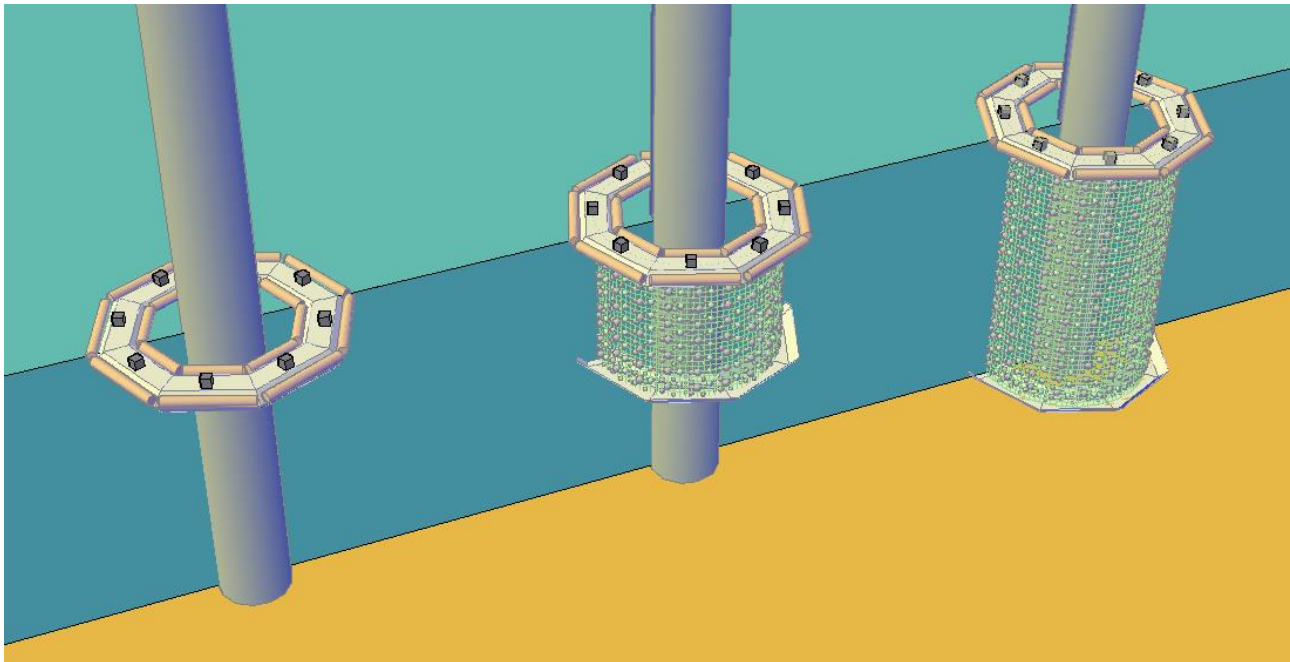
**Abbildung 2: Versuchsstände Laborhalle: Betonbecken (links) und Druckkessel (rechts)**

### I.3.3 Prototypen-Tests

Ein erster Prototyp des neuartigen Schallminderungssystems wurde beim Offshore-Windpark (OWP) *London Array* in Kooperation mit *Aarsleff Bilfinger Berger Joint Venture (ABJV)* eingesetzt. Dazu wurde aufbauend auf den Labor- und Technikumsversuchen ein HSD-Netz zum Einsatz bei einem Monopfahl entworfen und durch das IGB-TUBS hergestellt. Es waren die Materialien und Geometrien der HSD-Elemente sowie die Anordnung und Belegungsdichte im Netz zu bestimmen. Des Weiteren war eine technische Lösung zu entwickeln, wie das Netz beim Offshore-Einsatz über die Höhe der Wassersäule um den Pfahl aufgespannt werden kann (s. Abbildung 3).

Bevor das System bei der Installation eines Offshore-Gründungspfahles eingesetzt werden konnte, war eine Demonstration im Hafenbecken erforderlich. Zusätzlich waren Zertifikate für alle eingesetzten Geräte sowie die beteiligten Personen beizubringen und die geplanten Arbeitsabläufe und etwaige Risiken zu beschreiben. Die Rammung eines Pfahls mit Verwendung des Prototyps sowie eines Vergleichspfahles ohne Schallminderungssystem wurden messtechnisch begleitet. Von Bord des Errichterschiffes wurden durch das IGB-TUBS Nahbereichsmessungen durchgeführt. In der für die in Deutschland geltenden Grenzwerte des Hydroschalls maßgeblichen Entfernung von 750 m

wurden unabhängige Messungen durch das *Institut für technische und angewandte Physik GmbH (itap)* durchgeführt.



**Abbildung 3:** Prinzip des HSD-Systems beim Einsatz an einem Monopfahl mit zusammengefaltetem HSD-System (links), Absenken des Netzes (Mitte) und Netz im Endzustand (rechts) [vgl. Bruns et al., 2014]

Die beim ersten Prototyp-Test gesammelten Erfahrungen sollten für die Entwicklung eines weiteren Netzes genutzt werden, welches bei einem zweiten Offshore-Test beim OWP *DanTysk* zu einem späteren Zeitpunkt zum Einsatz kommen sollte. Dieser Test konnte jedoch aufgrund der Entscheidung des Bauträgers für ein anderes Schallminderungssystem nicht durchgeführt werden. Stattdessen konnten beim OWP *Amrumbank West*, wo das HSD-System zum ersten Mal in Serie eingesetzt wurde, Messungen durchgeführt werden.

In Abschnitt II.3 sind die Entwicklung, der Bau und der Einsatz des Prototyps beschrieben. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Offshore-Messungen vorgestellt.

## I.4 Stand der Technik

### I.4.1 Gründung von Offshore-Windenergieanlagen

Beim Ausbau der Offshore-Windenergie spielt die Gründung mehrerer hundert OWEA eine bedeutende Rolle. In den sandigen Böden der Nordsee bei Wassertiefen bis 40 m stellen unterschiedliche Pfahlsysteme die übliche Gründungstechnik dar. Je nach Randbedingungen kommen dazu Tripods, Tripiles, Jackets oder Monopiles zum Einsatz (vgl. Abbildung 4). Die Einbringung der offenen Stahlrohrpfähle erfolgt in aller Regel mittels hydraulischer Schlagrammen.

Die Gründungspfähle müssen die Belastungen aus Turbine und Turm sowie die an den Fundamente selbst angreifenden Welleneinwirkungen in den Baugrund ableiten, wobei zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs der Anlagen die Schiefstellungen der Struktur in sehr engen Grenzen zu halten sind. Das Eigengewicht der Anlagen spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Bei Monopfahlgründungen werden die Lasten maßgeblich über die seitliche Bettung der Pfähle abgetragen. Bei



den aufgelösten Strukturen werden die aus den vorwiegend horizontalen Einwirkungen resultierenden Momente in der Gründungsstruktur über Kräftepaare an den einzelnen Gründungspfählen über Druck und Zug abgetragen [Wiemann et al., 2002]. In beiden Fällen sind die Kräfte- und Momentengleichgewichte durch die Aufnahme axialer und lateraler Belastungen an den Gründungspfählen einzuhalten. Übliche Durchmesser für Offshore-Gründungspfählen betragen zwischen 2,5 m bis 3,5 m für aufgelöste Strukturen und 6 m bis 8 m für Monopfähle (Tripiles *BARD1*: 3,35 m; Tripod *alpha ventus*: 2,6 m, Monopiles *Amrumbank West*: 6 m).

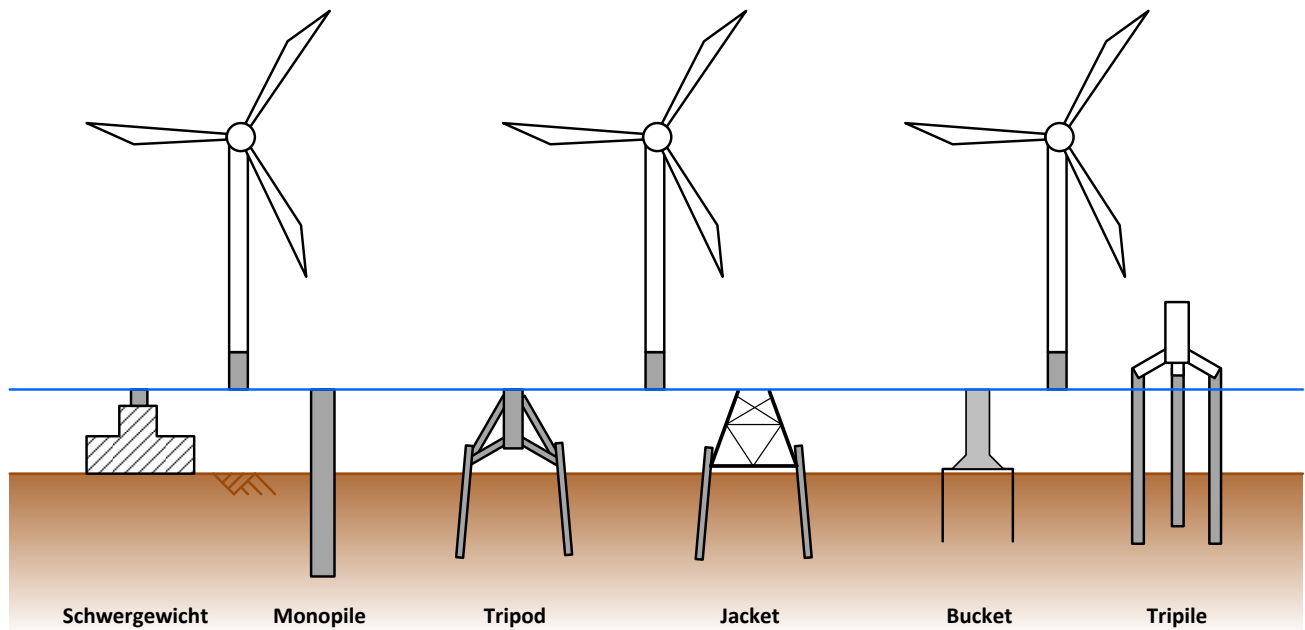


Abbildung 4: Gründungsmöglichkeiten für OWEA [nach Achmus, 2009]

Die Einbringung offener Stahlrohrpfähle mittels Schlagrammung erzeugt nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft eine Verdichtung des umgebenden Bodens, was wiederum zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit der Pfähle führt. Dieser Effekt wird nach den gültigen Bemessungsvorschriften zum Nachweis der Gründungen berücksichtigt. Bei der Vibrationsrammung als lärmärmeres Einbringungsverfahren kommt es im den Pfahl umgebenden Boden zu Kornumlagerungen, die während der Vibration einen nahezu vollständigen Verlust der Mantelreibung bedeuten und dadurch den Pfahl durch sein Eigengewicht in den Boden sinken lassen. Insbesondere die hierdurch bedingten Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Pfähle sind noch nicht vollständig geklärt, nach aktuellem Stand der Technik ist jedoch mit einer geringeren Tragfähigkeit im Vergleich zu geschlagenen Pfählen zu rechnen.

Derzeit wird die Vibrationstechnik hinsichtlich einer möglichen Gleichwertigkeit der Tragfähigkeit erforscht, u.a. im Rahmen des *VIBRO-Projects*. Dabei werden geschlagene und vibrierte Monopfähle durch Probelastungen auf ihre statische laterale Tragfähigkeit untersucht [vgl. Herwig/Gattermann, 2015]. Beim OWP *Riffgat* wurde das Vibrationsverfahren zur Einbringung von Monopfählen eingesetzt. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Tragfähigkeit wurden die Pfähle auf einer Länge, die 2 bis 3 Pfahldurchmessern entsprach, am Ende mittels Schlagrammung eingebracht [Fischer et al., 2013]. Die Schallemissionen während der Vibration waren wie erwartet deutlich geringer als während der Impulsrammung. Dabei entstand anstatt einzelner Schallereignisse eine kontinuierliche Emission. Aus diesem Grund ist zur Bewertung des Schalls anstatt des bei Im-



pulsrammungen üblichen Einzelereignispegels SEL der energieäquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  heranzuziehen. Diese beiden Pegel sind nicht ohne weiteres vergleichbar (vgl. Abschnitt 1.4.3). Inwiefern bei einem möglichen Einsatz der Vibrationstechnik in Zukunft auf den Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen verzichtet werden könnte, ist daher noch zu klären.

Des Weiteren gibt es Konzepte für Schwergewichtsgründungen, Bucket-Fundamente und schwimmende Gründungen, diese konnten bisher jedoch lediglich als Prototypen realisiert werden. Bis auf weiteres stellen damit mittels Schlagrammung installierte Pfahlgründungen die Vorzugsvariante bei der Errichtung von OWEA dar, was zu hohen Schallemissionen ins umgebende Meerwasser führt.

#### 1.4.2 Begrenzung des Unterwasserschalls

Marine Säuger nutzen Schall zur Kommunikation, Orientierung und Jagd. Beschallung kann Stress erzeugen oder die Kommunikation der Tiere maskieren, bei hoher Lautstärke und/oder langer Dauer können zeitweilige Hörschwellenverschiebungen hervorgerufen werden (TTS, temporary threshold shift). Diese zeitweilige Schwerhörigkeit ist messbar und wird als Kriterium für Schallgrenzwerte herangezogen [Lucke, 2012].

Die Beeinträchtigung verschiedener Fischarten durch Unterwasserlärm ist weniger untersucht, grundsätzlich kommt es jedoch zu den gleichen Folgen (Störung, Maskierung, Schädigung). Dabei variiert die Hörbarkeit stark und weicht bei einigen Arten sowohl in der Frequenz als auch hinsichtlich der Pegel stark von der bei Säugern ab [Müller-Blenkle, 2012]. Bei der Schlagrammung offener Stahlpfähle wurden in den USA Fische verletzt und getötet [Stadler, 2012].

Analog zur Abnahme des Hydroschallpegels nimmt der Grad der Beeinträchtigung von Meerestieren in seiner Stärke mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle ab (vgl. Abbildung 5).

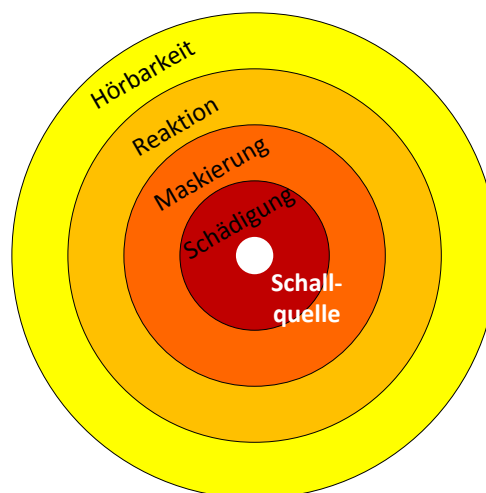


Abbildung 5: Einwirkzonen einer Schallquelle [nach Elmer et al., 2007]

Zum Schutz mariner Lebewesen wurden durch das Umweltbundesamt (UBA) auf Grundlage von Beobachtungen an Schweinswalen Grenzwerte für impulsartigen Hydroschall, wie er z.B. bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA entsteht, vorgeschlagen und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) bestätigt. Danach darf in 750 m Entfernung zum Pfahl der Einzelereignispegel (SEL, sound exposure level) einen Wert von 160 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2\text{s}$  und der Spitzenschalldruckpegel ( $L_{peak}$ ) einen Wert von 190 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  nicht überschreiten [UBA, 2011; BMU, 2013]. Angaben zur Durchführung von Hydroschallmessungen und zur Berechnung der ent-

sprechenden Pegelgrößen sind in Messvorschriften des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), welches die zuständige Genehmigungsbehörde für Arbeiten in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone ist, zusammengefasst [Müller/Zerbs, 2013]. Erklärungen zur Ermittlung der wichtigsten Kennwerte sind im folgenden Abschnitt I.4.3 zu finden.

Durch die bei Rammarbeiten in OWP obligatorischen Begleitmessungen des Hydroschalls entsprechend dem im Standard zur Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt [BSH, 2013] beschriebenen Standarduntersuchungskonzept des BSH (StUK4) wurde eine breite Datenbasis an Hydroschallmessungen bei Projekten mit verschiedenen Randbedingungen zusammengetragen. Maßgeblich für die auftretenden Pegel bei Offshore-Rammungen ist danach der Pfahldurchmesser (vgl. Abbildung 6), welcher auch die Auswahl des verwendeten Hammers stark beeinflusst. Weitere Einflussfaktoren sind die Wassertiefe, der Baugrund, die Rammenergie und der Rammfortschritt.

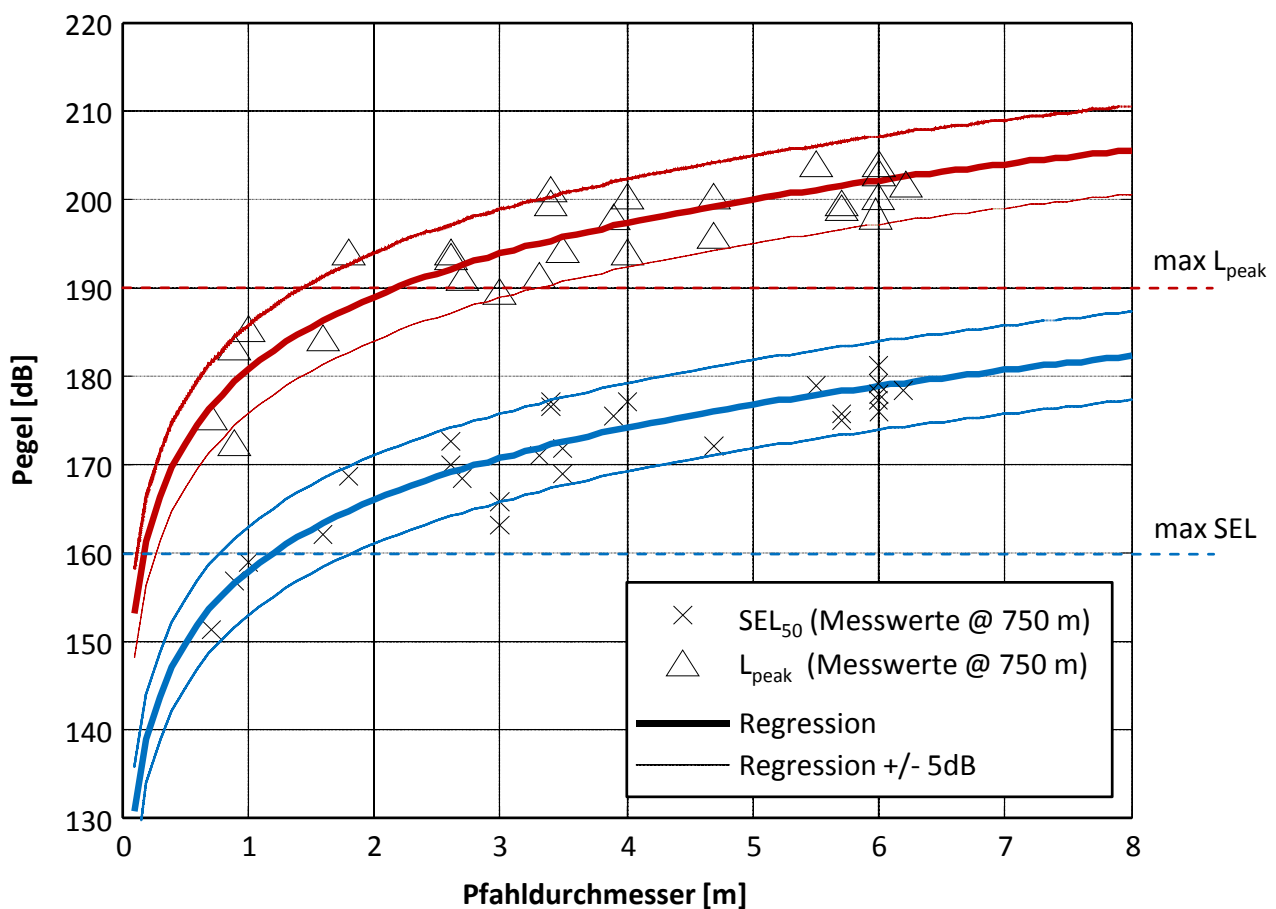


Abbildung 6: Rammschallpegel in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers [nach Bellmann, 2014]

Es ist zu beachten, dass die bisherigen Projekte in Wassertiefen bis 30 m durchgeführt wurden, die maximalen Pfahldurchmesser lagen bei etwa 6 m. Darüber hinaus gibt es keine Erfahrungswerte.

Die Begleitmessungen bei Pfahlrammungen im Wasser ergaben unter den herrschenden Randbedingungen eine Überschreitung der Grenzwerte ab einem Pfahldurchmesser von etwa 1 m bis 2 m, was alle üblichen Pfahlabmessungen bei OWP unterschreitet. Zur Einhaltung der Grenzwerte des Unterwasserschalls ist daher der Einsatz schallmindernder Systeme erforderlich. Als eine der ersten

Anwendungen im Offshore-Bereich kann der Große Blasenschleier während der Rammung des Monopfhales der Forschungsplattform *FINO3* genannt werden.

Bei Monopfhählen ( $\varnothing = 5.7$  m) können die Grenzwerte unter Berücksichtigung der Streuungen und Unsicherheiten hinsichtlich verschiedener Randbedingungen um 25 dB (SEL) überschritten werden [Bellmann, 2014]. Bei Errichtung von OWEA in größeren Wassertiefen und damit tendenziell steigenden Pfahldurchmessern sind einzelne Schallminderungssysteme nicht in der Lage, die Einhaltung der Grenzwerte des Hydroschalls zu gewährleisten.

Die Dämpfungswirkung des Blasenschleiers basiert auf der unterschiedlichen Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Wasser und Luft, welche durch einen Impedanzsprung Reflektionen und Refraktionen des Schalls am Blasenschleier hervorruft. Das Prinzip des Blasenschleiers ist ausführlich im Forschungsvorhabens *Schall 2* (FKZ 0329947) beschrieben worden [vgl. Elmer et al. 2007]. Nähere Untersuchungen unter Offshorebedingungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens *Hydro-schall-Off BWII* (FKZ 0325309A/B/C) durchgeführt [vgl. Diederichs et al., 2014].

Für den Einsatz bei Bauarbeiten in OWP sind die Großen Blasenschleier, bevor oder nachdem sich das Errichterschiff positioniert hat, von einem separaten Schiff in einigem Abstand um dessen Position auszulegen. Dabei sind zum einen marine Sicherheitsauflagen zu erfüllen, zum anderen ist der Abstand des Blasenschleiers zum Pfahl so groß zu wählen, dass die Strömung den Blasenring nicht so weit vom Pfahl wegdriften lässt, dass dieser schließlich außerhalb des Blasenschleiers liegt (vgl. Abbildung 7).

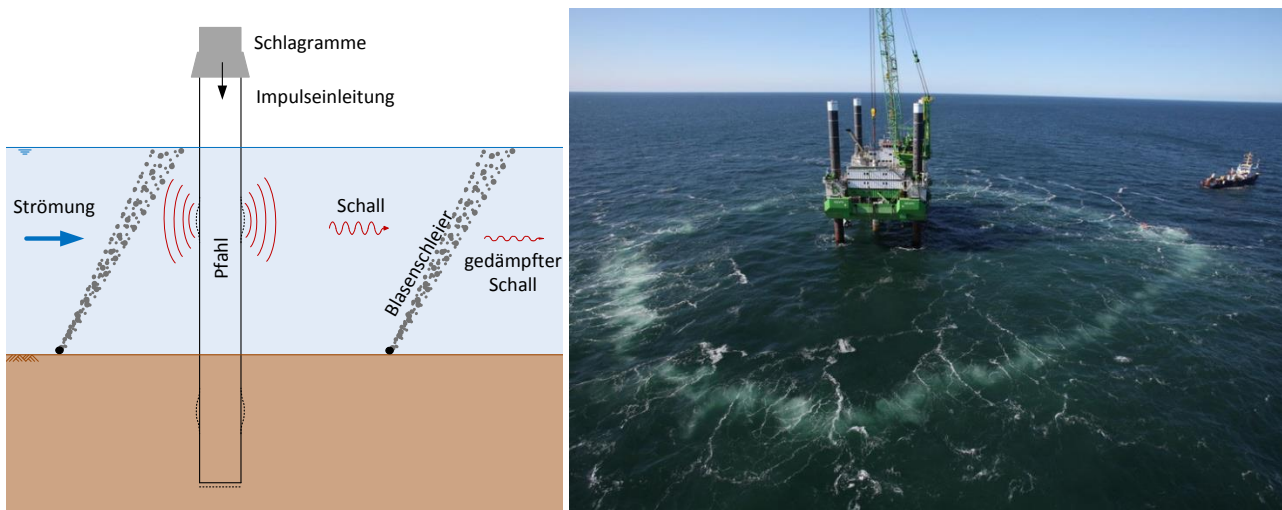


Abbildung 7: Prinzipskizze des großen Blasenschleiers (links) und Einsatz beim OWP *Borkum West II* (rechts) [Trianel, o.J.]

Der Große Blasenschleier wurde in verschiedenen Konfigurationen getestet. Dabei wurden z.B. der Volumenstrom der Luft oder der Lochabstand und die Lochgröße des Luftschlauches variiert. Des Weiteren werden von verschiedenen Anbietern Blasenschleier angeboten, die entweder unter Druck verlegt werden, wenn das Installationsschiff schon in Position ist (post-lay, *Weyres Offshore*) oder aber bei denen vor Ankunft des Errichterschiffes ein Schlauch verlegt wird, der erst später mit Druckluft beaufschlagt wird (pre-lay, *HydroTechnik Lübeck*). Zudem gibt es Variationen mit einem oder mehreren Blasenschleiern (z.B. DBBC, double big bubble curtain). Hier ist ein ausreichender Abstand der einzelnen Blasenschleier untereinander für eine optimale Schallminderung nötig [Die-

derichs et al., 2014]. Mit einfachen Großen Blasenschleiern können Schallreduzierungen von 10 dB bis 15 dB (SEL) erreicht werden, doppelte Große Blasenschleier erreichen eine zusätzliche Schallminderung von etwa 4 dB (SEL) [Bellmann et al., 2015].

Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, liegt die Hauptdämpfungswirkung des großen Blasenschleiers im Frequenzbereich zwischen ca. 300 Hz und 10.000 Hz und damit weitestgehend oberhalb des Hauptenergiegehaltes von Rammschlägen, welcher je nach eingesetztem Hammer und Pfahlgeometrie etwa bei 100 Hz bis 1.000 Hz liegt (vgl. Abbildung 11).

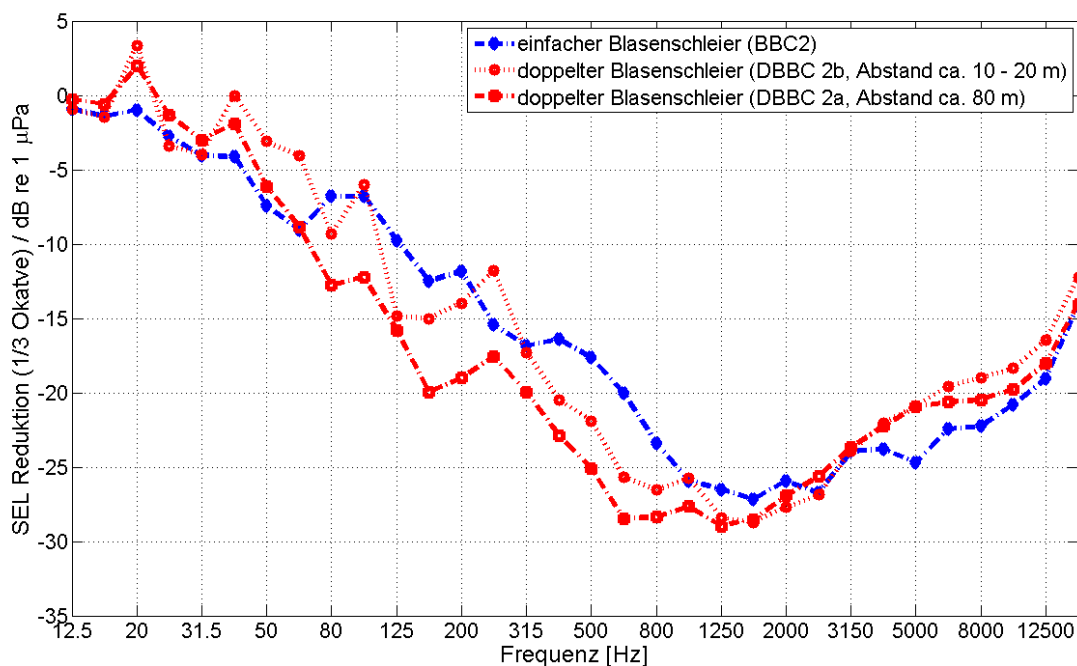


Abbildung 8: Gemittelte Differenzspektren des SEL durch den Einsatz verschiedenen Blasenschleierkonfigurationen beim OWP *Borkum West II* normiert auf eine Entfernung von 750 m zum Pfahl [Diederichs et al., 2014]

Die Schallminderungswirkung von Gasblasen im Wasser durch Streuung und Absorption ist stark frequenzabhängig. Kugelförmige Luftblasen haben in Wasser bei Größen bis etwa 5 mm eine Eigenfrequenz von über 1.000 Hz, erst größere Blasen könnten niedrigere Frequenzen effektiv dämpfen. Bei nicht-sphärischen Blasen, welche beim Aufsteigen in Wasser entstehen, ist die Resonanzfrequenz noch höher [Medwin/Clay, 1998]. Bei bisherigen Einsätzen des Blasenschleiers, aber auch bei Laborversuchen, konnten stabile Luftblasen mit Eigenfrequenzen bis etwa 1.000 Hz erzeugt werden. Größere, meist flunderförmige Luftblasen zeigen ein instabiles Verhalten und teilen sich beim Aufsteigen im Wasser in kleinere Blasen.

In niedrigeren Frequenzen kommt für die Schallminderung durch Luftblasen daher nur der Impedanzsprung zwischen Wasser und Luft-Wasser-Gemisch zum Tragen. Resonanzeffekte werden nicht wirksam. Ändert sich die Schallkennimpedanz  $Z$  des Mediums, in dem sich eine Welle ausbreitet, wird diese an der Grenze der unterschiedlichen Impedanzen zum Teil reflektiert. Eine Änderung der Impedanz kann durch Änderung der Dichte  $\rho$  oder der Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  hervorgerufen werden. Im Wasser erzeugen Luftblasen bereits bei geringer Konzentration eine starke Veränderung der Schallgeschwindigkeit und damit der akustischen Kennimpedanz [Elmer et al., 2007; 2011].

Parallel zur Planung weiterer OWP wurden alternative Systeme zur Rammschallminderung entwickelt, die jedoch im Vergleich zum Großen Blasenschleier nicht in einiger Entfernung um die Baustelle ausgebracht werden müssen, sondern direkt am Pfahl eingesetzt werden können. Auch hier wurde das Prinzip des Blasenschleiers bei Systemen mit gestuften oder geführten Blasenschleiern wieder aufgegriffen, welche das Problem des Verdriftens auf verschiedene Arten lösen. Eine weitere Gruppe bilden die Rohr-in-Rohr-Systeme, bei denen der Pfahl innerhalb einer größeren Struktur gerammt wird, welche den Pfahl durch Luft und/oder Dämmmaterialien vom umgebenden Meerwasser trennt und die Schallübertragung vermindert. Auch kombinierte Systeme aus Rohren und Blasenschleiern wurden entwickelt.

Einen anderen Ansatz verfolgt das HSD-System, bei welchem die schallmindernden Phänomene von Luftblasen in Form von Ballons oder Schaumstoffelementen genutzt werden sollen, jedoch im Vergleich zu frei aufsteigenden Blasen hinsichtlich Größe und Position besser kontrolliert werden können. So kann die Eigenfrequenz gasgefüllter Körper auf das Frequenzspektrum von Offshore-Rammungen abgestimmt werden, um die Resonanzeffekte bei der Schallminderung optimal auszunutzen [Elmer et al., 2011].

Das Prinzip gasgefüllter Blasen zur Minderung von Unterwasserschall ist von Dr. Elmer patentiert (Pat. Nr. DE102008017418B4).

Zur Untersuchung der Wirksamkeit neuartiger Schallminderungsverfahren wurden verschiedene Systeme an einem Testpfahl der Fa. *Menck* in der Lübecker Bucht (*Brodteener Pfahl*) eingesetzt. Die Durchführung sowie die anschließende Auswertung der gesammelten Messdaten erfolgte im Rahmen des Forschungsvorhabens *Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl* (ESRa, FKZ 0325307). Zwar liegt der Durchmesser des Pfahles mit 2,2 m durchaus in einem Bereich, der mit Durchmessern von Gründungspfählen für Jackets oder Tripods vergleichbar ist, jedoch ist bei dem Standort (Wassertiefe 8,5 m) eher von nearshore-Bedingungen zu sprechen. Auch die eingesetzte Rammenergie (max. 300 kJ) ist mit offshore-Bedingungen nicht zu vergleichen. Die größte Schwierigkeit für die Schallminderungssysteme stellten jedoch der fest mit dem Baugrund verwachsene Pfahl und seine enorme Einbindelänge von ca. 65 m dar. Bei den Rammungen konnte keine Verschiebung des Pfahles hervorgerufen werden, was ein gänzlich anderes Verhalten, als bei der Installation von Offshore-Gründungspfählen bedeutet. Zudem ist davon auszugehen, dass deutlich größere Erschütterungen im Boden erzeugt wurden, welche die direkt am Pfahl eingesetzten Schallminderungssysteme untertunnelten und in größerer Entfernung die Schallminderungswirkung herabsetzten. Messungen im Abstand von ca. 6 m zum Pfahl zeigten daher deutlich bessere Ergebnisse als die für alle getesteten Systeme ernüchternden Fernbereichsmessungen. Beim *ESRa*-Test wurde auch ein HSD-System eingesetzt, welches eine Schallminderung von über 13 dB (SEL) im Nahbereich erreichen konnte. Die frequenzabhängige Dämpfung ist in Abbildung 12 dargestellt.

Zu Beginn des Vorhabens war der Große Blasenschleier das einzige seriell einsetzbare System zur Minderung von Unterwasserschall bei Offshore-Rammarbeiten. Es war lediglich mit einem Anbieter am Markt vertreten. Aktuell werden bei Rammarbeiten in OWP Große Blasenschleier zweier verschiedener Anbieter sowie der IHC Noise Mitigation Screen der Fa. *IHC Merwede* und das HSD-System von der Fa. *OffNoise-Solutions* eingesetzt.

### 1.4.3 Schalltechnische Grundlagen

Unter Schall wird eine rasche Schwankung des Druckes verstanden, welche den im Wasser herrschenden hydrostatischen Druck überlagert. Die Ausbreitung der Schallwellen, also die Änderung des Schalldrucks, erfolgt im Wasser mit einer Geschwindigkeit  $c$  von etwa 1.500 m/s. Abhängig von der Wassertiefe, der Wassertemperatur und der Salinität schwankt dieser Wert um etwa  $\pm 50$  m/s. In der Nordsee kann ganzjährig von einer guten Durchmischung des Wassers ausgegangen werden, sodass die Schallgeschwindigkeit über die Wassertiefe sehr konstant ist und nur jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. In der Ostsee hingegen bilden sich durch Schichtungen im Wasser ausgeprägte Schallkanäle aus [Gerdes/Ludwig, 2014]. Die Schallgeschwindigkeit  $c$  ist nicht zu verwechseln mit der Schallschnelle  $v$  (Partikelgeschwindigkeit), welche die Bewegung der Wasserteilchen um ihre Ruhelage beschreibt. Schalldruck und Schallschnelle sind über die akustische Kennimpedanz  $Z$  verknüpft:

$$Z = \frac{p}{v} \quad (1)$$

Die Impedanz  $Z$  ist definiert als das Produkt aus Dichte  $\rho$  und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  des betrachteten Mediums:

$$Z = \rho \cdot c \quad (2)$$

Bei der Rammung von OWEA auftretende Schallereignisse (Rammschläge) sind in der Regel impulsartig und weisen keinen ausgeprägten periodischen Charakter auf. Die Signale lassen sich dennoch näherungsweise als Überlagerung sinusförmiger Schwingungen beschreiben, welche sich hauptsächlich im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 1.000 Hz (vgl. Abbildung 9) bewegen.

Zur Beschreibung der Lautstärke von Schall bzw. Unterwasserschall werden i.d.R. Pegelgrößen verwendet. Hierbei handelt es sich um logarithmierte Werte der Dezibel (dB)-Skala, welche sich in der Hydroakustik auf einen Referenzdruck  $p_0$  von 1  $\mu$ Pa beziehen (daher auch die Einheit dB re 1  $\mu$ Pa).

Für die Bewertung von Rammschallereignissen sind hinsichtlich der Grenzwerte des Hydroschalls der Spitzenpegel  $L_{peak}$  sowie der Einzelereignispegel  $L_E$  bzw. SEL (sound exposure level) von Bedeutung. Der Spitzenpegel wird durch die Überführung des maximalen absoluten Druckes  $p_{peak}$  eines Intervalls (z.B. eines Rammschlages) in die Dezibel-Skala ermittelt:

$$L_{peak} = 20 \log \left( \frac{|p_{peak}|}{p_0} \right) \quad (3)$$

Der Spitzenpegel gibt damit ausschließlich Auskunft über den maximalen Ausschlag eines Signals. Ist man dagegen am Energiegehalt eines Rammschlages interessiert, ist auch die Länge des Ereignisses zu betrachten. Der Einzelereignispegel berücksichtigt dies, indem Schalldruck über einen gewählten Zeitraum integriert und auf die Mittelungszeit  $T_0$  von 1 s bezogen wird:

$$SEL = L_E = 10 \log \left( \frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (4)$$

Auch der SEL bezieht sich als Pegelgröße auf den Referenzdruck von 1  $\mu\text{Pa}$ . Da jedoch der Schalldruck quadriert und auf eine Sekunde normiert wird, lautet die Einheit dieser Pegelgröße [dB re 1  $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ ].

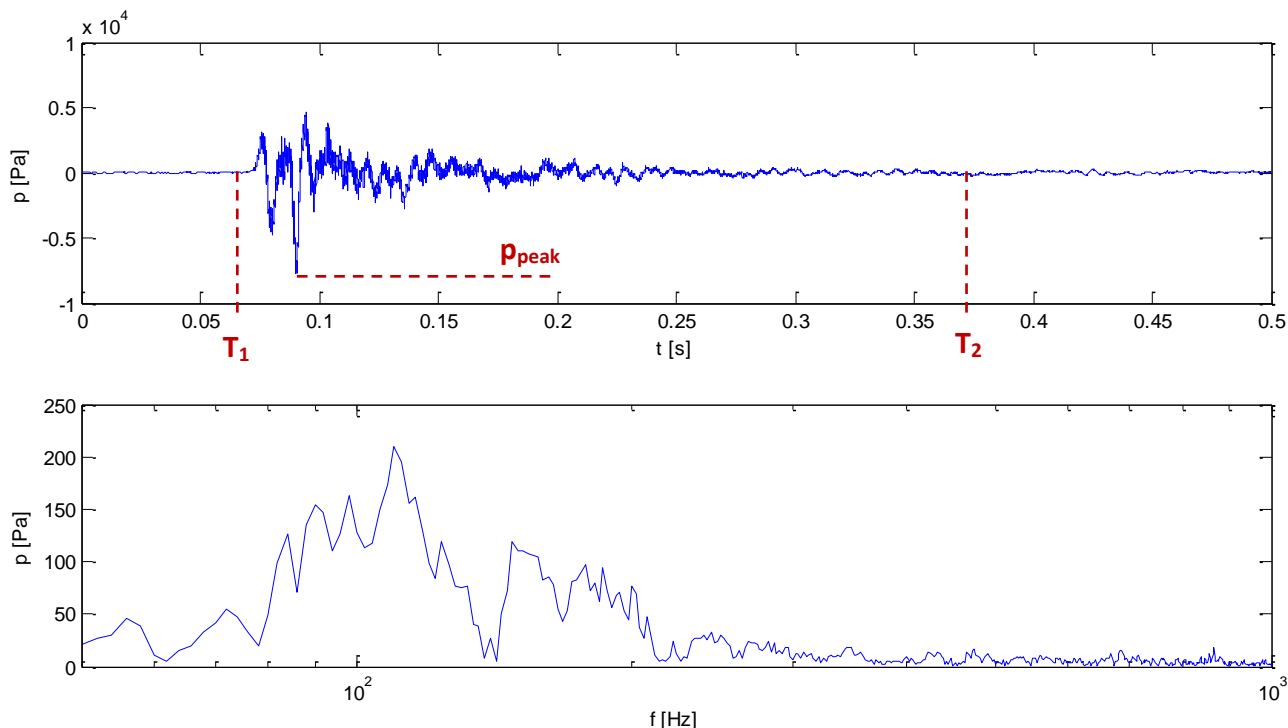


Abbildung 9: Zeitsignal (oben) und Frequenzspektrum (unten) eines Rammschlages des Pfahles A45 beim OWP Am-rumbank West in 72 m Entfernung zum Pfahl

Die Grenzen des Schallereignisses zu den Zeitpunkten  $T_1$  und  $T_2$  müssen für die Berechnung des SEL so gewählt werden, dass einerseits das gesamte Signal erfasst wird und keine Signalanteile verloren gehen. Andererseits sollen keine Störgeräusche vor oder nach dem eigentlichen Ereignis das Ergebnis verfälschen. Bei Offshore-Rammungen spielt der Hintergrundlärm i.d.R. eine so geringe Rolle, dass ein zu langes Signal zu keiner Überschätzung des SEL führt, sofern nicht schon der folgende Rammschlag beginnt. Wird hingegen ein zu kurzer Teil des Signals ausgeschnitten, kann der SEL leicht unterschätzt werden. Der Einzelereignispegel eines Rammschlages ist stets geringer als der zugehörige Spitzenpegel.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch auf den Mittelungspegel oder energieäquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  nach Formel (5) hingewiesen.

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (5)$$

Damit ist der Mittelungspegel gleichbedeutend mit einem Effektivpegel [Elmer et al., 2007]. Bei Impulsartigen Schallereignissen wie z.B. Rammschlägen hängt der  $L_{eq}$  stark von der Signallänge  $T$  ab, welche nach der Messvorschrift des BSH auf 30 s festgelegt ist [Müller/Zerbs, 2011]. Bei Rammarbeiten in OWP wird im Allgemeinen der SEL als Maß für den Energiehalt der Schallereignisse verwendet. Eine Empfehlung für einen Grenzwerte des  $L_{eq}$  [UBA, 2011] liegt nicht vor.

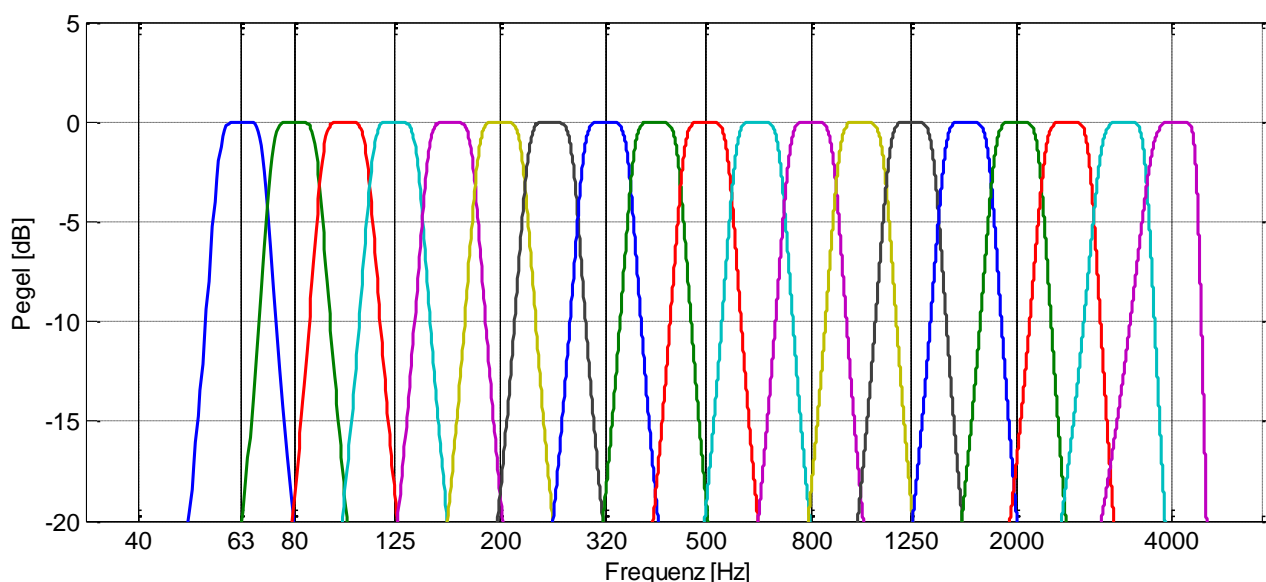
$L_{eq}$  und SEL können über die Beziehung



$$SEL = L_{eq} - 10 \log \left( \frac{nT_0}{T} \right) \quad (6)$$

in Bezug gesetzt werden, wobei  $n$  die Anzahl der Einzelereignisse ist. Damit entspricht der Einzelergebnispegel SEL eines Impulses dem äquivalenten Dauerschallpegel  $L_{eq}$  eines kontinuierlichen Signals von 1 s Dauer mit der gleichen Energie wie der Impuls.

Neben dem Einzelergebnispegel und dem Spitzenpegel wird auch die Zusammensetzung von Schallereignissen im Frequenzbereich untersucht. In Abbildung 9 (unten) ist das Ergebnis einer Fast Fourier Transformation (FFT) eines Schallsignals dargestellt, welches den Schalldruck über den Frequenzbereich zeigt. Üblicherweise wird die Auflösung über den Frequenzbereich der Übersichtlichkeit halber weniger genau vorgenommen und in Terzen zusammengefasst. Dazu wird zunächst das zu untersuchende Schallsignal mittels verschiedener Bandpassfilter gefiltert. Ein Bandpassfilter erhält nur denjenigen Teil eines Signals, der im Bereich eines bestimmten Frequenzbandes liegt. Der Rest des Signals wird stark gedämpft und damit quasi ausgeschnitten (vgl. Abbildung 10).



**Abbildung 10: Filterantworten einzelner Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 4.000 Hz**

Nach Aufteilung des zu untersuchenden Signales in die einzelnen Frequenzbänder erfolgt für jede Terz eine Berechnung des Einzelschallereignispegels (SEL) nach Gleichung (4). Das Ergebnis einer Terzanalyse gibt ebenso wie die FFT Rückschluss über den Frequenzgehalt eines Signals, jedoch in weniger genauer Auflösung über den Frequenzbereich, was bei Rammschallmessungen i.d.R. auch nicht nötig ist. Abbildung 11 zeigt die Terzspektren verschiedener Impulsrammen bei unterschiedlichen Projekten.



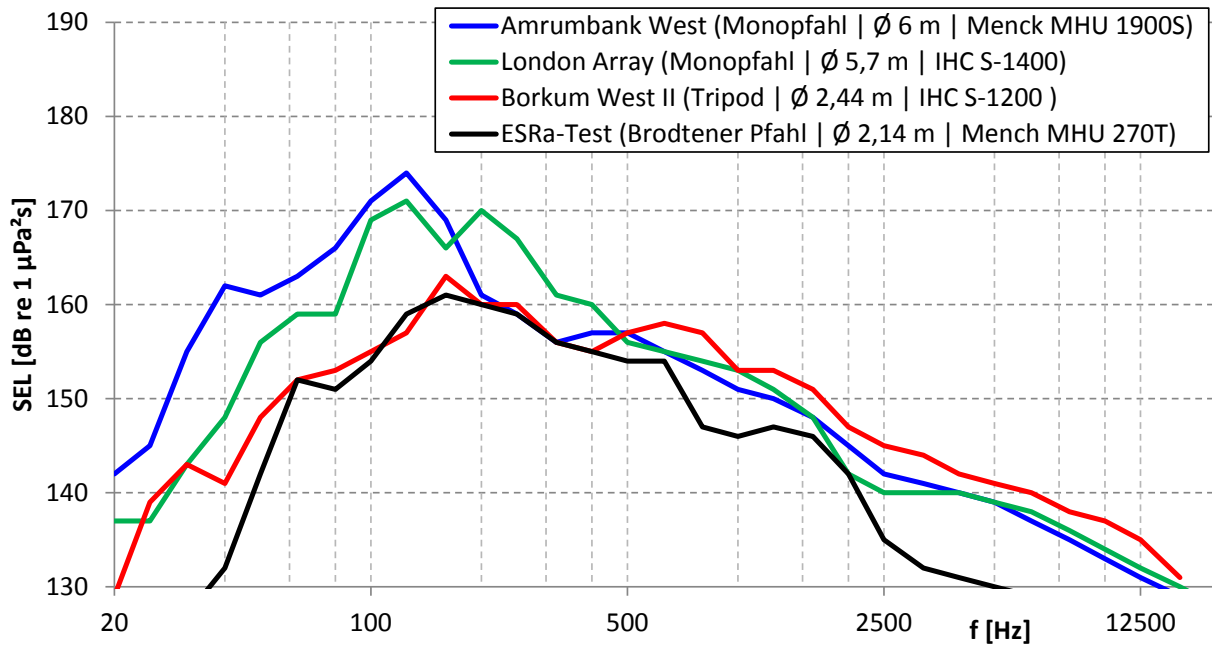


Abbildung 11: Terzspektren der bei verschiedenen Projekten eingesetzten Rammgeräte in 750 m Entfernung zum Pfahl

Zur Beschreibung der Pegeländerung, z.B. durch den Einsatz eines Schallminderungssystems, wird der Differenzwert eines Pegels bei verschiedenen Messungen unter sonst gleichen Randbedingungen gebildet:

$$\Delta L = L_{Referenz} - L_{Variante} \quad (7)$$

Differenzpegel können z.B. für den Einzelereignispegel SEL, den Spitzenpegel  $L_{peak}$  oder auch für die einzelnen SEL des Terzspektrums gebildet werden. Das dadurch ermittelte Terzspektrum wird auch Differenzspektrum genannt. Abbildung 12 zeigt neben zwei Terzspektren (links) das Differenzspektrum (rechts) des HSD-Systems beim *ESRa*-Test.

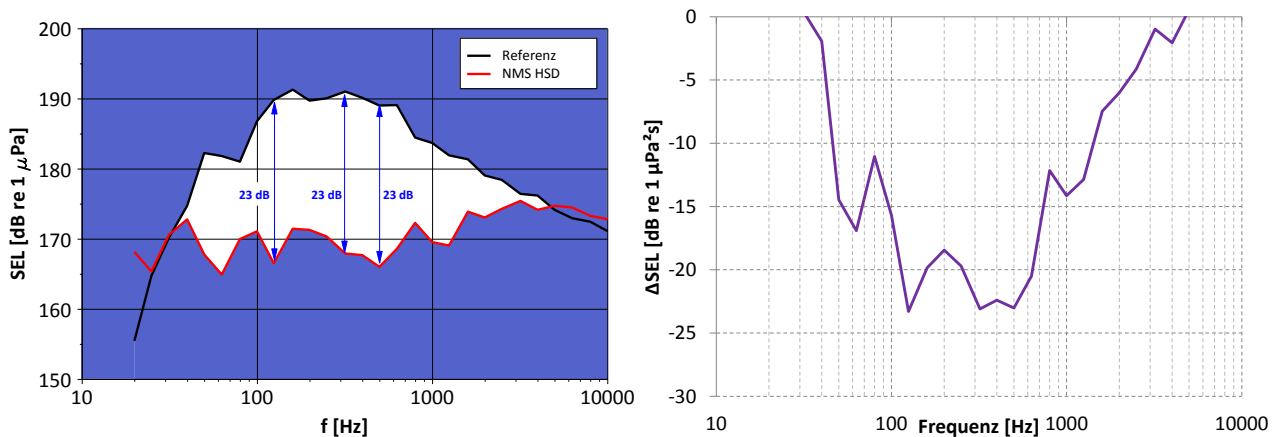


Abbildung 12: Terzspektren beim *ESRa*-Test (links) [Wilke et al., 2012] mit Referenzmessung (schwarze Linie) und Messung bei Einsatz des HSD-Systems (rote Linie) sowie Differenzspektrum beider Messungen (rechts)

Im linken Teil der Abbildung sind die Terzspektren der Referenzmessung sowie einer Messung mit Einsatz des HSD-Systems zu sehen. Die Größe der weißen Fläche dazwischen ist ein Maß für die

Dämpfungswirkung des Systems. Über den Abstand der beiden Terzspektren lässt sich für jede Terz die frequenzabhängige Dämpfung ermitteln. Auf der rechten Seite ist diese Differenzbildung bereits vollzogen und in Form eines Differenzspektrums über die verschiedenen Terzen abgebildet.

#### I.4.4 Auszug der verwendeten Fachliteratur, Berichte und anderer Quellen

**Achmus, M. (2009)**

Bemessung von Gründungselementen für Offshore-Windenergieanlagen – Stand des Wissens und offene Fragen. 7. FZK-Kolloquium, Potenziale für die Maritime Wirtschaft, Hannover, 26. März 2009, S. 145- 155

**Bellmann, M. (2014)**

Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2014. 16-19 November 2014, Melbourne

**Bellmann, M.; Remmers, P.; Gündert, S.; Müller, M.; Holst, H.; Schultz-von Glahn, M. (2015)**

Is there a State-of-the-Art regarding Noise Mitigation Systems to reduce Pile-Driving Noise? Conference on Wind energy and Wildlife impacts (CWW 2015). Berlin, March 10-12 2015

**Bilfinger Berger Maschinentechnik (2012)**

Technische Zeichnungen und Ablaufpläne.

**Branz, K. (2010)**

Experimentelle Versuche zur Hydroschalldämmung bei der Rammung von Offshore-Gründungsstrukturen. Bachelorarbeit (unveröffentlicht) am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Braunschweig

**Brekhoskikh, L.M.; Lysanov, Yu.P. (2003)**

Fundamentals of Ocean Acoustics. 3rd edition, Springer-Verlag, New York

**van de Brug, E.; Peters, M.; Jung, B. (2015)**

Offshore-Foundation-Drilling – Gebohrte Offshore-Fundamente. Pfahlsymposium 2015, Braunschweig, 19.-20. Februar 2015. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 99, 2015, S. 397-408

**Bruns, B.; Stein, P.; Kuhn, C.; Sychla, H.; Gattermann, J. (2014)**

Hydro sound measurements during the installation of large diameter offshore piles using combinations of independent noise mitigation systems. Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering (Internoise 2014), Melbourne, 16.-19. November 2014

**Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2011)**

Offshore-Windparks Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen. Hamburg

**Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2013)**

Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4). Standard, Hamburg und Rostock

**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013)**

Konzept für den Schutz der Schweinswale vor Schallbelastungen bei der Errichtung von Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee (Schallschutzkonzept). Berlin

**Diederichs, A.; Pehlke, H.; Nehls, G.; Bellmann, M.; Gerke, P.; Oldeland, J.; Grunau, C.; Witte, S.; Rose, A. (2014)**

Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten – Schlussbericht Hydroschall-Off BWII. Förderkennzeichen 0325309A/B/C, Husum

**Elmer, K.-H.; Gattermann, J.; Fischer, J.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Stahlmann, J. (2011)**

Hydroschalldämpfer zur Reduktion von Unterwasserschall bei Offshore-Gründungen. Pfahlsymposium 2011, 17.-18. Februar 2011, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 94

**Elmer, K.-H. (2010)**

Pile driving noise reduction using new hydro sound dampers. BSH-Workshop on Pile Driving (ECS2010), Stralsund, 21 March 2010

**Elmer, K.-H.; Betke, K.; Neumann, T. (2007)**

Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen – Abschlussbericht Schall 2. Förderkennzeichen 03229947, Hannover

**Fischer, J.; Sychla, H.; Bakker, J.; de Neef, L.; Stahlmann, J. (2013)**

A comparison between impact driven and vibratory driven steel piles in the German North Sea. Proceedings of the Conference on Maritime Energy (COME 2013). May 21-22 2013, Hamburg, S. 361-380

**Gattermann, J.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Zahlmann, J.; Elmer, K.-H. (2012)**

Energie- und Hydroschallmessungen im Nahbereich des Pfahles beim Forschungsprojekt ESRa. Appendix 2 zu: Wilke, F.; Kloske, K.; Bellmann, M: Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl (ESRa) – technischer Abschlussbericht. Förderkennzeichen 0325307

**Gerdes, F.; Ludwig, S. (2014)**

Besonderheiten der Schallausbreitung in der Ostsee. 2. DUH-Schallschutz-Tagung, Wege zu einem wirksamen Unterwasserschallschutz beim Bau von Offshore-Windparks, 7. Mai 2014, Berlin

**Henke, M. (2012)**

Untersuchung zur axialen Tragfähigkeit und zur Rammpfahlebarkeit der Gründungspfähle beim Offshore-Windpark London Array. Masterarbeit (unveröffentlicht) am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Braunschweig

**Herwig, V.; Gattermann, J. (2015)**

VIBRO-Project – Vergleich der lateralen Tragfähigkeit von vibrierten und geschlagenen Stahlpfählen in sandigen Böden. Pfahlsymposium 2015, Braunschweig, 19.-20. Februar 2015. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 99, 2015, S. 251-265

**Institut für Technische und Angewandte Physik (itap) (2013)**

Untersuchung und Erprobung von Hydroschalldämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen – Auswertung der Hydroschallmessungen im OWP London Array. Messbericht, Projekt-Nr. 1918-c-bel, Version 4, Oldenburg

**Institut für Technische und Angewandte Physik (itap) (2014)**

Messung der Hydroschallimmissionen bei den Rammarbeiten zur Gründung der OWEA A58, A57 und A45 im Offshore Windpark Amrumbank West – Bericht der Referenzmessung mit Schallschutzsystem. Messbericht, Projekt-Nr. 2282-14-bel, Version 1

**Koschinski, S.; Lüdemann, K. (2013)**

Entwicklung schallmindernder Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen. Bundesamt für Naturschutz, Nehnten und Hamburg

**London Array Limited (2015)**

London Array – The world's largest offshore wind farm. Project brochure,  
<http://www.londonarray.com/wp-content/uploads/London-Array-Brochure.pdf>

**Lucke, K. (2012)**

Nur gestört oder schon verletzt? – Die Auswirkungen von Unterwasserschall auf unterschiedliche Fitnessmerkmale von Meeressäugern. In: Klein, L.; Koschinski, S.; Lüdemann, K.; Stöcker, U. (Hrsg.): Zwischen Naturschutz und Energiewende – Herausforderung Schallschutz beim Bau von OWP. Berlin, 25.-26. September 2012

**Medwin, H. et al. (2005)**

Sounds in the Sea, Cambridge University Press, New York

**Müller, A.; Zerbs, C. (2011)**

Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen – Aktuelle Vorgehenshinweise und Anmerkungen. Hamburg

**Müller, A.; Zerbs, C. (2013)**

Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßnahmen. Hamburg, [http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/Messvorschrift\\_Schalldaemmassnahmen.pdf](http://www.bsh.de/de/Produkte/Buecher/Standard/Messvorschrift_Schalldaemmassnahmen.pdf)

**Müller-Blenkle, C. (2012)**

Verhaltensreaktionen, Maskierungseffekte und Verletzungen – Der Einfluss von Unterwasserschall auf das (Über)Leben von Fischen. In: Klein, L.; Koschinski, S.; Lüdemann, K.; Stöcker, U. (Hrsg.): Zwischen Naturschutz und Energiewende – Herausforderung Schallschutz beim Bau von OWP. Berlin, 25.-26. September 2012

**Medwin, H.; Clay, C. (1998)**

Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, San Diego

**Stadler, J. (2012)**

Experiene with the application of underwater sound criteria for cumulative sound exposure. In: Klein, L.; Koschinski, S.; Lüdemann, K.; Stöcker, U. (Hrsg.): Zwischen Naturschutz und Energiewende – Herausforderung Schallschutz beim Bau von OWP. Berlin, 25.-26. September 2012

**Stein, P.; Sychla, H.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Gattermann, J.; Degenhardt, J. (2015)**

Dämpfungswirkung von HSD und BBC bei der Rammung von Monopfählen beim OWP Amrumbank West. 41. Jahrestagung für Akustik (DAGA 2015), 16.-19. März 2015, Nürnberg

**Trianel Windkraftwerk Borkum GmbH Co. KG (2015)**

Trianel Offshore-Windpark Bildergalerie. <http://www.trianel-borkum.de/de/windpark/bildergalerie.html>

**Umweltbundesamt (2014)**

Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA).  
Mai 2011 <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/empfehlung-von-laermschutzwerten-bei-errichtung-von>

**Urlick, R. (1983)**

Principles of underwater sound. 3rd edition, Peninsula Publishing, Los Altos/CA, USA

**Wiemann, J.; Lesny, K.; Richwien, W. (2002)**

Gründung von Offshore-Windenergieanlagen - Gründungskonzepte und geotechnische Grundlagen.  
Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Band 29, VGE

**Wilke, F.; Kloske, K.; Bellmann, M (2012)**

Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl (ESRa) – technischer Abschlussbericht. Förderkennzeichen 0325307

eigene Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens:

**Bruns, B. (2013)**

Evaluation of hydrosound and vibration measurements during the use of the Hydro-Sound-Dampers (HSD) at the wind farm London Array. 166th Meeting of the Acoustical Society of America held in San Francisco, CA, USA, 2-6 Dec 2013, Vol. 134, No. 5 Pt. 2 of 2

**Bruns, B.; Kuhn, C (2013)**

Mitigation of offshore piling noise - Offshore application of Hydro Sound Dampers (HSD). 9th WAB Offshore Conference (windforce 2013), Bremerhaven, 4.-6. Juni, 2013

**Bruns, B.; Kuhn, C; Gattermann, J.; Elmer, K.-H. (2013)**

Offshore Test of Hydro Sound Dampers at 'London Array' - Measurements of noise mitigation and ground vibrations. DEWI Magazin No. 43, August 2013

**Bruns, B.; Kuhn, C.; Stein, P.; Gattermann, J.; Elmer, K.-H. (2014)**

The new noise mitigation system 'Hydro Sound Dampers': history of development with several hydro sound and vibration measurements. Proceedings of 43rd International Congress on Noise Control Engineering, Internoise 2014, Melbourne, 16.-19. November 2014

**Bruns, B.; Kuhn, C.; Stein, P.; Gattermann, J.; Elmer, K.-H.; Imhorst, F. (2012)**

Underwater noise reduction from measurements and offshore tests using systems of hydro sound dampers (HSD). German Wind Energy Conference (DEWEK 2012), Bremen, 7-8 November 2012

**Elmer, K.-H.; Bruns, B.; Kuhn, C (2014)**

A new effective method to reduce offshore piling noise. 10th WAB Offshore Conference, Windforce 2014, Bremerhaven, 17.-19. Juni, 2014

**Elmer, K.-H.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Gattermann, J. (2012)**

Mitigation of underwater piling noise using balloons and foam elements. 11th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA2012) held in Edinburgh, UK, 2-6 July 2012

**Elmer, K.-H.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Gattermann, J.; Stahlmann, J. (2011)**

Mitigation of underwater piling noise using new hydro sound dampers (HSD). 8th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (FMGM) 2011, 12-16 September 2011, Berlin

**Elmer, K.-H.; Gattermann, J.; Fischer, J.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Stahlmann, J. (2011)**

Hydroschalldämpfer zur Reduktion von Unterwasserschall bei Offshore-Gründungen. Pfahl-Symposium 2011, Fachseminar am 17./18.02.11 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 94, S. 243-261

**Elmer, K.-H.; Gattermann, J.; Kuhn, C.; Bruns, B.; Stahlmann, J. (2012)**

Mitigation Of Underwater Piling Noise Using Balloons And Foam Elements As Hydro Sound Dampers. 11th European Conference on Underwater Acoustics, 2-6 July 2012, Edinburgh, UK, CD ISBN: 978-1-906913-13-7, P. 1142-1149

**Gattermann, J.; Bruns, B.; Kuhn, C.; Stahlmann, J.; Elmer, K.-H. (2012)**

Reduction Of Underwater Piling Noise Using Novel Hydro Sound Dampers (HSD). 2nd International Conference on Offshore Foundations for Wind Turbines, 2-5 July 2012, Bremen

**Kuhn, C.; Bruns, B. (2013)**

Hydro Sound Dampers (HSD) - A new offshore piling noise mitigation system. 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, 23.-28. Juni 2013, Corfu island, Greece

**Kuhn, C.; Bruns, B.; Fischer, J.; Gattermann, J.; Elmer, K.-H. (2012)**

Development of a New Underwater Piling Noise Mitigation System Using Hydro Sound Dampers (HSD). 31st. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2012), Rio de Janeiro, Brazil, Volume 4, ISBN 978-0-7918-4491-5, pp. 195-202

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### I.5.1 Danksagung

Unser Dank gilt dem Fördermittelgeber für die Finanzierung der Arbeiten und dem Projektträger Jülich für die gute Zusammenarbeit bei allen administrativen Belangen des Vorhabens. Die Messungen in den OWP *London Array* und *Amrumbank West* wurden vom *Aarsleff Bilfinger Berger Joint Venture*, der *London Array Ltd.* sowie der *E.ON Kraftwerke GmbH* und *E.ON Climate & Renewables GmbH* ermöglicht. Besonderer Dank gilt Focko Imhorst für seine Unterstützung bei den Vorbereitungen und der Durchführung des ersten Prototypen-Einsatzes. Auch möchten wir uns bei der Mannschaft des Errichterschiffes *MPI Discovery* bedanken, die uns beim Einsatz des HSD-Prototyps unterstützte. Unseren wissenschaftlichen Hilfskräften danken wir für die vielen Stunden, die sie in die Fertigung der Netze und der Vorbereitung der investiert haben. Ohne diesen Einsatz wären derartige Vorhaben nicht möglich!

### I.5.2 Unterstützende Stellen

Das Forschungsvorhaben wurde maßgeblich von Mitarbeitern des IGB-TUBS bearbeitet. Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen kam jedoch an einigen Stellen des Vorhabens zustande:

- Ausleihe einer Airgun vom Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität (CAU) zu Kiel für die Durchführung von Technikumsversuchen
- Kooperation mit *Aarsleff Bilfinger Berger Joint Venture (ABJV)* zur Durchführung des Prototypen-Tests beim OWP London Array

- Durchführung von Hydroschallmessungen beim Prototypen-Test durch die *Institut für technische und angewandte Physik GmbH (itap)*
- Zusammenarbeit mit *E.ON Climate & Renewables* bei den Messungen zum HSD-Einsatz beim *OWP Amrumbank West*
- Beratungen im Rahmen des Vorhabens durch Herrn Dr. Karl-Heinz Elmer, *OffNoise-Solutions GmbH*

Zudem wurden Leistungen von Dritten in Anspruch genommen, die für die Durchführung des Vorhabens notwendig waren, jedoch in keinem Zusammenhang zum wissenschaftlichen Inhalt des Vorhabens stehen.

Dem Institut für Geowissenschaften der CAU Kiel wurde ermöglicht, im Rahmen des Offshore-Tests beim *OWP London Array* Messungen mittels OBS (Ocean Bottom Seismometer) durchzuführen.

## II. Eingehende Darstellung des Forschungsvorhabens:

### II.1 Labor- und Technikumsversuche

#### II.1.1 Messequipment Laborversuche

Für die in den folgenden Abschnitten beschriebenen, unterschiedlichen Versuche kamen jeweils baugleiche Messgeräte zur Erfassung des Hydroschalls zum Einsatz (vgl. Tabelle 1). Soweit keine Anregung durch einen Stoßimpuls erfolgte, wurden die Hydroschallsignale mit den gleichen Lautsprechern erzeugt.

Die eingesetzten Geräte für Hydroschallmessungen stammen von der Fa. *Brüel & Kjær*. Es handelt sich um hochpräzise Hydrophone für den Unterwasser-Einsatz, Messverstärker und Datenerfassungseinheiten. Der Messaufbau erfolgte unabhängig vom Versuchsaufbau immer nach dem gleichen Schema: Die kapazitiven Hydrophone vom Typ 8013 werden an den NEXUS-Ladungsverstärker angeschlossen. Hier werden die Signale verstärkt und dann von der Datenerfassungseinheit LAN-XI in ein digitales Signal umgewandelt, welches von einem handelsüblichen Laptop mit entsprechender Software aufgezeichnet werden kann.

**Tabelle 1: Equipment zur Durchführung der Messungen im Labor**

Gerät	Typ	Hersteller	Eigenschaften
Verstärker			
Lautsprecher	Typ H062M	AquaMusique	
Signalerzeugung (Software)	MatLab	Mathworks	Sweep, 10..4.000 Hz
Hydrophon	8013	Brüel & Kjær	Messbereich 0,1 Hz..20 kHz
Messverstärker	NEXUS 2692	Brüel & Kjær	
Datenerfassung (Hardware)	LAN-XI 3052-B	Brüel & Kjær	
Datenerfassung (Software)	Pulse	Brüel & Kjær	
Beschleunigungsaufnehmer	WM353B11	PCB	Messbereich: 1.000 g
Beschleunigungsaufnehmer	WM350B03	PCB	Messbereich: 10.000 g
Druckaufnehmer	SM111A21	PCB	Messbereich: 690 kPa
Druckaufnehmer	SM111A26	PCB	Messbereich: 3.450 kPa
Messdatenrekorder	LX-110	Teac	Kanäle: 8 Messbereich: DC – 20 kHz
Datenerfassung (Software)	DASYLab	Roga	



Dasselbe Messequipment wurde auch bei den Offshore-Tests zur Untersuchung des Hydroschalls im Nahbereich eingesetzt.

Bei Messungen im Versuchsrohr wurden zusätzlich Beschleunigungsaufnehmer und Drucksensoren der Fa. *PCB* verwendet. Die Datenerfassung erfolgte über einen Messdatenrekorder der Fa. *Teac* sowie Software der Fa. *Roga*.

## II.1.2 Untersuchte Elemente

Ein Ziel des Vorhabens bestand darin, geeignete Materialien und Geometrien für den Einsatz als HSD-Elemente zu finden. Dazu wurden verschiedene Körper den in den folgenden Abschnitten beschriebenen Versuchen unterzogen, um Aussagen über das Dämpfungsverhalten (Stärke und Frequenzbereich) sowie die Dauerhaftigkeit machen zu können. Bei der Auswahl der einzusetzenden Materialien und Körper wurde darauf geachtet, dass diese augenscheinlich eine ausreichende Robustheit für den Einsatz unter Offshore-Bedingungen haben würden und dem Prinzip von HSD (gasgefüllte Körper) entsprachen. Zudem waren die Verfügbarkeit und der Preis der Elemente von Bedeutung, da für Offshore-Einsätze Netze mit mehreren 100 m<sup>2</sup> Fläche zu bestücken sind.

Beim *ESRa*-Test kamen Latex-Ballons (handelsübliche Luftballons) sowie Schwimnudeln (auch Pool-Nudeln, eingesetzt als Spiel- und Turngerät in der Aquafitness) aus Polyethylen-Schaum (EPE) als HSD-Elemente zum Einsatz. Diese beiden Ansätze wurden weiter verfolgt und Varianten der Elemente untersucht. So wurde z.B. den Schwimnudeln durch Schneiden und Stanzen andere Größen und Formen gegeben. Ausgehend von der Grundform einer länglichen Nudel mit etwa 7 cm Durchmesser wurden verschieden lange Stücke geschnitten. Zudem wurden aus diesen Elementen kleinere Körper mit einem Durchmesser von etwa 3,5 cm gestanzt. Auch die dabei übrig gebliebenen, hohlen Nudeln wurden als HSD-Elemente getestet. Die Latex-Ballons wurden mit verschiedenen Drücken aufgeblasen und variierten in der Membranstärke.

Als weitere Schaumstoffe wurden zum einen vorwiegend geschlossenzelliger Polypropylen-Schaumstoff (EPP, Markenname Neopolen®, *BASF*) und zum anderen gemischtzellige Polyurethan-Elastmore (PUR, Markenname Sylomer®, *RRG*) beprobt. Neopolen® bot sich für die Herstellung größerer Elemente an, während Sylomer® in vielen verschiedenen Varianten verfügbar ist und eine Untersuchung des Einflusses der Steifigkeit auf die Dämpfungseigenschaften ermöglichte.

Als Alternative zu den recht filigranen Latex-Ballons wurden Ballblasen aus Gummi und Naturkautschuk untersucht. Zudem wurden Schläuche von Schubkarren-Reifen eingesetzt, welche aufgrund ihrer torus-artigen Form ein gänzlich anderes dynamisches Verhalten haben.

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der Elemente zu sehen, welche bei den Labor- und Technikums-Versuchen sowie bei den verschiedenen Offshore-Tests eingesetzt wurden.

Die akustischen Eigenschaften der untersuchten Körper werden in den folgenden Abschnitten zu den Laborversuchen beschrieben. An dieser Stelle soll auf einige andere Erkenntnisse hinsichtlich der Eignung als HSD-Elemente eingegangen werden.

Latex-Ballons lassen sich durch Variation der Luftmenge zu Kugeln verschiedener Durchmesser aufblasen. Es handelt sich im einfachsten Fall um einfache Luftballons, wie sie im Alltag vielfach Verwendung finden. Diese genügen allerdings nicht den Anforderungen aus dem Umweltmilieu offshore, sodass die Widerstandsfähigkeit zu verbessern war. Dies ließ sich durch die Kombination von zwei Ballons (doppelte Membran) und durch den Einsatz ebenfalls erhältlicher, robusterer Ballons

erreichen. Derartige Elemente wurden beim *ESRα*-Test erfolgreich eingesetzt. Sie bedürfen jedoch trotzdem einer vorsichtigen Behandlung, da einzelne Elemente bei Beschädigungen gänzlich zerstört werden. Für Offshore-Anwendungen erscheinen sie daher ungeeignet.

Schaumstoffe zeichnen sich durch eine deutlich höhere Robustheit aus. Beschädigte Elemente besitzen weiterhin schallmindernde Eigenschaften. Durch verschiedene Verfahren ist eine Formgebung von Schaumstoffen möglich, um die akustischen Eigenschaften zu optimieren.

**Tabelle 2: als HSD-Elemente untersuchte Körper**

Bezeichnung	Material	Form	Abmessungen	Bild
Latex-Ballon	Latex	Kugel	$\varnothing = 11 \text{ cm}$	
Nudel (normal)	EPE	Zylinder	$\varnothing = 6,8 \text{ cm}$ $h = 7 \text{ cm}$	
Nudel (klein)	EPE	Zylinder	$\varnothing = 3,5 \text{ cm}$ $h = 7 \text{ cm}$	
Nudel (kurz)	EPE	Zylinder	$\varnothing = 3,5 \text{ cm}$ $h = 3,5 \text{ cm}$	
Nudel (lang)	EPE	Zylinder	$\varnothing = 6,8 \text{ cm}$ $h = 14 \text{ cm}$	
Nudel (hohl)	EPE	Hohlzylinder	$D = 6,8 \text{ cm}$ $d = 3,5 \text{ cm}$ $h = 7 \text{ cm}$	

Tabelle 2 (Forts.): als HSD-Elemente untersuchte Körper


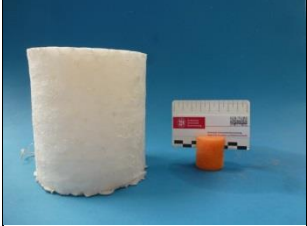
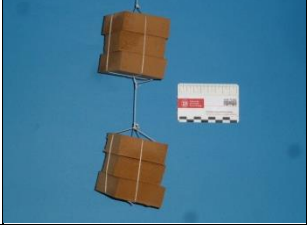
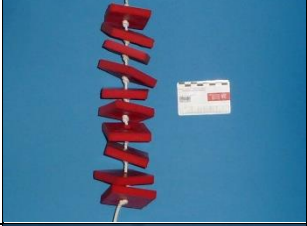


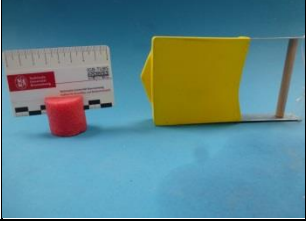
Bezeichnung	Material	Form	Abmessungen	Bild
Schaumstoffball	Schaumstoff	Kugel	$\varnothing = 6,5 \text{ cm}$	
Neopolen®	EPP	Zylinder	$\varnothing = 12 \text{ cm}$ $h = 12,5 \text{ cm}$	
Sylomer® (SR11/18/42/ 55/110/450)	PUR	Quader	$a = 6 \text{ cm}$ $b = 6,5 \text{ cm}$ $h = 2,5 \text{ cm}$	
Sylomer® (SR220)	PUR	Quader	$a = b = 6,5 \text{ cm}$ $h = 1,3 \text{ cm}$	
Schwamm	offenporiger Schaumstoff	Quader	$a = 33 \text{ cm}$ $b = 24 \text{ cm}$ $h = 5 \text{ cm}$	
Resonator (klein)	Latexballon auf Metallrahmen		$a = 5 \text{ cm}$ $b = 3 \text{ cm}$ $h = 10 \text{ cm}$	
Resonator (groß)	Latexballon auf Metallrahmen		$a = 8 \text{ cm}$ $b = 2 \text{ cm}$ $h = 15 \text{ cm}$	

Tabelle 2 (Forts.): als HSD-Elemente untersuchte Körper


Bezeichnung	Material	Form	Abmessungen	Bild
Ballblase (schwarz)	Gummi	Kugel	$\varnothing = 11 \text{ cm}$	
Ballblase (schwarz)	Gummi	Kugel	$\varnothing = 16 \text{ cm}$	
Ballblase (schwarz)	Gummi	Kugel	$\varnothing = 13 \text{ cm}$	
Ballblase (orange)	Naturkautschuk	Kugel	$\varnothing = 11 \text{ cm}$	
Schlauch (groß)	Gummi	Torus	$D_{\text{außen}} = 35 \text{ cm}$ $d_{\text{Schlauch}} = 7,6 \text{ cm}$	
Schlauch (klein)	Gummi	Torus	$D_{\text{außen}} = 25 \text{ cm}$ $d_{\text{Schlauch}} = 3,8 \text{ cm}$	

### II.1.3 Laboruntersuchungen Betonbecken

Die frequenzabhängige Dämpfung verschiedener HSD-Elemente (s. Tabelle 4) wurde in einem eigens für diesen Zweck entwickelten, schwingungsarmen Betonbecken (s. Tabelle 3) untersucht. Dazu wurden die Elemente in dem mit Wasser gefüllte Becken platziert und über einen Unterwasserlautsprecher mit einem sinusförmigen Tonsignal steigender Frequenz (Sweep) angeregt. Durch

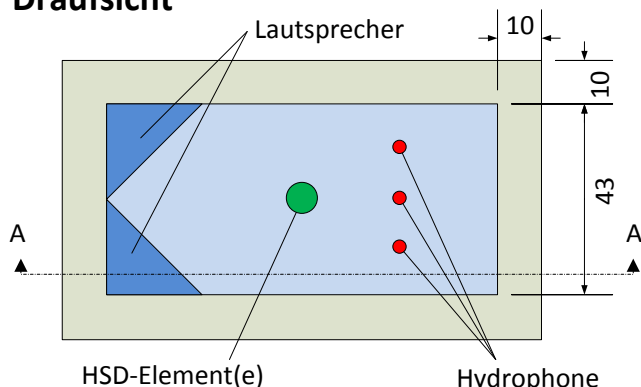
die große Masse des Beckens wurde ein Einfluss durch dessen Eigenschwingungen im untersuchten Frequenzbereich von 10 Hz bis 4.000 Hz vermieden.

**Tabelle 3: Betonbecken für Laborversuche**

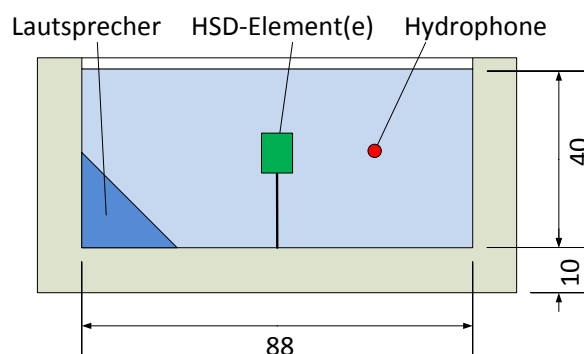
Länge x Breite x Höhe (außen) [cm]	108 x 63 x 55	
Wandstärke [cm]	10	
Fassungsvolumen [l]	150	
Masse [kg]	400	
Material	WU-Beton	

Zur Wiedergabe des Sweeps wurden zwei Unterwasserlautsprecher an einen handelsüblichen Verstärker angeschlossen, der Sweep selbst wurde am Computer generiert. Die Messwerterfassung erfolgte mittels des in Abschnitt II.1.1 beschriebenen Equipment. Zwischen den Unterwasserlautsprechern und mehreren Hydrophonen wurden die zu untersuchenden Elemente angeordnet (vgl. Abbildung 13). Diese wurden über eine Schnur so am Boden fixiert, dass sie sich auftriebsbedingt etwa in der Mitte der Wassersäule befanden.

**Draufsicht**



**Schnitt A-A**



**Abbildung 13: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Elementen im Betonbecken**

Der Versuchsaufbau wurde in verschiedenen Einzelversuchen variiert. Dabei wurden neben der Dämpfungswirkung einzelner HSD-Elemente die Gruppenwirkung sowie der Einfluss des Abstandes zwischen HSD-Element und Schallquelle untersucht.

Tabelle 4 zeigt die Minderung des SEL beim Einsatz verschiedener Elemente. In Serie 1 wurden einzelne HSD-Elemente verschiedener Art untersucht. Serie 2 zeigt die Ergebnisse mehrerer (n) Körper, die in Summe ein Volumen von ca. 2.100 cm<sup>3</sup> aufweisen. Auf diese Weise konnten die Dämpfungswirkungen verschiedener Körper untereinander verglichen werden. Ein Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Serien miteinander ist nicht möglich, da der in Serie 1 verwendete Verstärker zu Beginn von Serie 2 defekt wurde und ein anderer Verstärker verwendet werden musste.

Tabelle 4: Versuchsergebnisse zur Untersuchung von HSD-Elementen im Betonbecken

Bezeichnung	HSD-Element				Serie 1			Serie 2		
	Material	D [cm]	h [cm]	d [cm]	n	V [cm <sup>3</sup> ]	ΔSEL [dB]	n	V [cm <sup>3</sup> ]	ΔSEL [dB]
Nudel (klein)	EPE	3,5	7,0	-	1	67	4,6	32	2155	5,8
Nudel (normal)	EPE	7,0	7,0	-	1	269	11,7	8	2155	5,0
Nudel (hohl)	EPE	7,0	7,0	3,5	1	202	†	11	2222	4,0
Nudel (lang)	EPE	7,0	14,0	-	1	539	11,0	4	2155	4,1
Neopolen®	EPP	11,0	12,0	-	1	1140	5,8	2	2281	4,4
Ballon, einfach	Latex	11,0	-	-	1	697	12,3	3	2091	7,3
Ballon, doppelt	Latex	11,0	-	-	1	697	12,2	3	2091	†
Ballblase	Gummi	11,0	-	-	1	697	12,6	3	2091	7,8
Schlauch, klein	Gummi	22,0	-	4,5	1	1099	14,6	2	2198	8,1
Schlauch, groß	Gummi	25,0	-	6,0	1	2221	15,4	1	2221	8,1

† Versuch nicht auswertbar

Im Folgenden werden beispielhaft einige Ergebnisse von Versuchen an ausgewählten HSD-Elementen verglichen. Neben den Terzspektren aus Versuchen mit HSD-Elementen (farbige Linien) ist jeweils ein Referenzspektrum aus einer Messung ohne HSD-Elemente dargestellt (schwarze gestrichelte Linie). In den Frequenzanalysen ist der Verlauf der Terzspektren der Versuche mit HSD-Elementen unterhalb der Referenzkurve auf eine Schallminderungswirkung der untersuchten Elemente im jeweiligen Frequenzbereich zurückzuführen.

Abbildung 14 zeigt Frequenzanalysen der Messungen bei Sweep-Anregung von Neopolen®-Elementen, Nudeln und einer Ballblase. Es zeigt sich, dass die verschiedenen Elemente in unterschiedlichen Frequenzbereichen antworten, wobei die Ballblase am weitesten im tieffrequenten Bereich wirkt und die Nudeln im höherfrequenten Bereich die beste Wirkung erzielen.

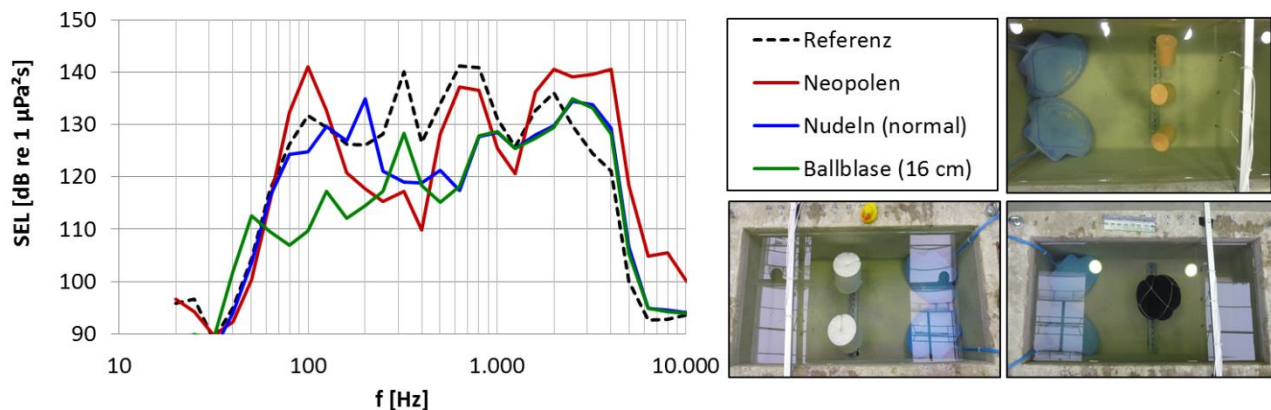


Abbildung 14: Terzspektren verschiedener im Betonbecken untersuchter Elemente (links) und Fotos der Versuche (rechts)



Versuche mit Elementen einer Sorte und mit Kombinationen verschiedener Elemente haben ergeben, dass sich die Dämpfungseigenschaften im Frequenzbereich gegenseitig ergänzen. In Abbildung 15 ist dies am Beispiel von Nudeln und Latex-Ballons dargestellt.

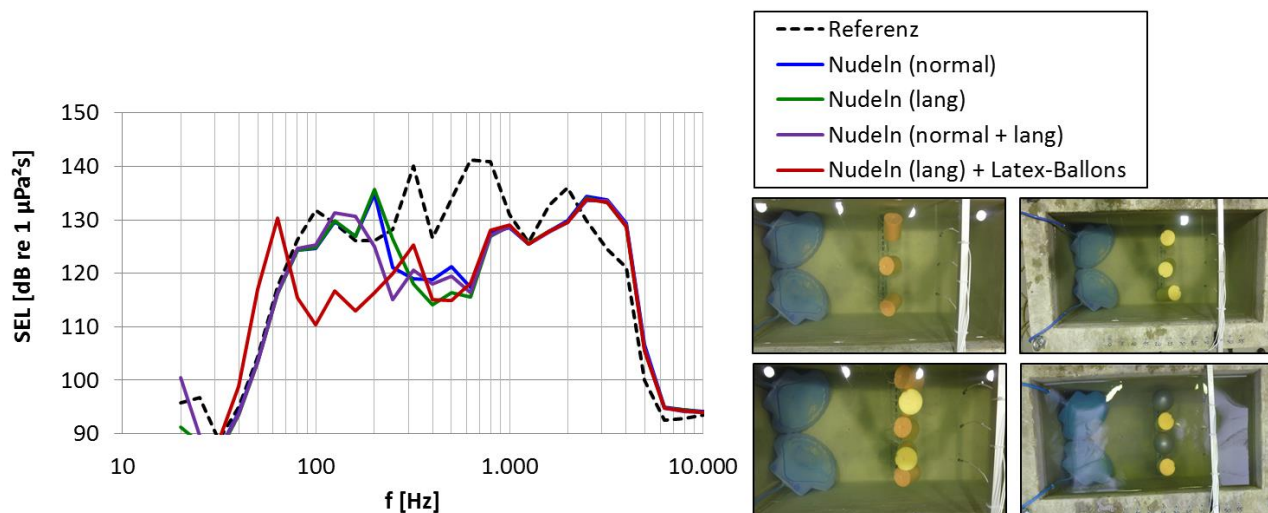


Abbildung 15: Terzspektren von im Betonbecken untersuchten Nudeln einzeln und in Kombination (links) und Fotos der Versuche (rechts)

Es wurden zudem gleiche Elemente bei unterschiedlicher Anordnung untersucht. Die Elemente wurden dabei entweder ohne Kontakt nebeneinander ins Becken gehängt oder kompakt in der Mitte platziert, wobei die Elemente Kontakt zueinander hatten (Abbildung 16). Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied im akustischen Verhalten.

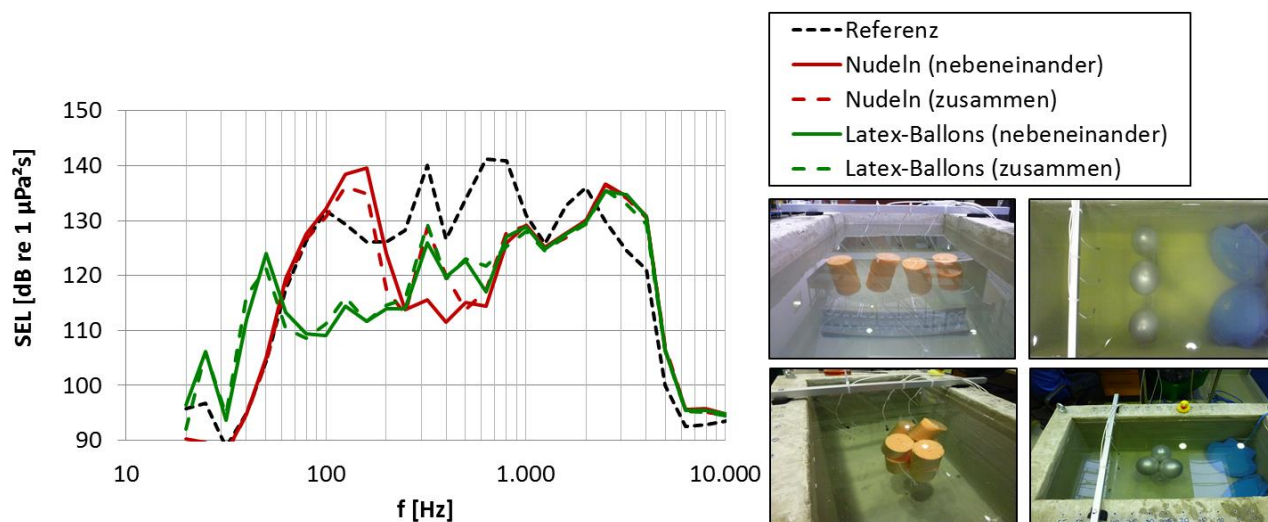


Abbildung 16: Vergleich der Terzspektren von Elementen mit und ohne Kontakt im Betonbecken (links) und Fotos der Versuche (rechts)

Bei Versuchen mit Sylomer®-Elementen konnte der Einfluss der Steifigkeit auf das Resonanzverhalten untersucht werden. Die unterschiedlichen Elemente aus Polyurethan-Schaum unterschieden sich nicht in ihrer Geometrie, sondern lediglich in der Material-Steifigkeit. Die Bezeichnung gibt dabei Aufschluss über den statischen Einsatzbereich als Dämpfungselement für Maschinen oder ähnliches, wobei SR450 die größte Steifigkeit besitzt um am höchsten belastbar ist. Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen mit den PUR-Elementen. Im Frequenzbereich um 200 Hz wird

deutlich, wie die Dämpfungseigenschaften der verschiedenen Elemente bei größerer Steifigkeit erst mit höheren Frequenzen wirksam werden, weichere Elemente also tiefe Frequenzen besser mindern.

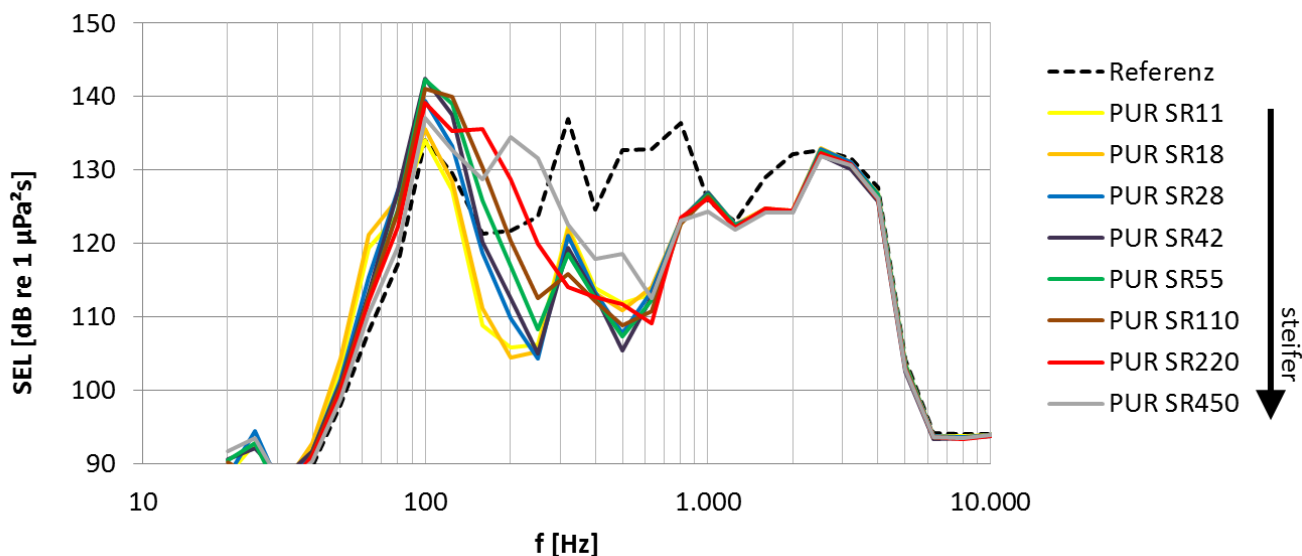


Abbildung 17: Terzspektren der im Betonbecken untersuchten Sylomer®-Elemente

Die Frequenzspektren aller untersuchten Elemente finden sich in Anhang B. Durch den Versuch können Aussagen darüber getroffen werden, wie sich verschiedene Körper einzeln, in Kombination und bei unterschiedlicher Anordnung bei Anregung durch Hydroschall bestimmter Frequenzen verhalten. Dies ermöglicht die gezielte Abstimmung von HSD-Elementen auf die bei Rammschlägen im Offshore-Bereich auftretenden Frequenzen.

Darüber hinaus wurde der Versuchsaufbau im Rahmen des Vorhabens zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von HSD-Elementen genutzt (vgl. Abschnitt II.1.8).

#### II.1.4 Laboruntersuchungen Versuchsrohr

Der Versuchsstand besteht aus einem wassergefüllten Rohr mit einer Gesamtlänge von 40,4 m und einem Innendurchmesser von 59 cm. Der Wasserdruck kann zwischen 0 und 30 kPa (3 bar) variiert werden, um die hydrostatischen Druckverhältnisse in bis zu 30 m Wassertiefe zu simulieren. Über Revisionsöffnungen ist es möglich, HSD-Körper und Sensoren im Rohr einzubauen. Diese werden über Schnüre an Magneten am Boden des Rohres befestigt und können durch Anpassung der Schnurlänge in der Mitte des Rohres platziert werden.

Es wurden verschiedene (vgl. Tabelle 5) der in Abschnitt II.1.2 beschriebenen Körper in verschiedenen Anordnungen untersucht. Jeweils vor (Hydrophon 1) und hinter (Hydrophon 2) den HSD-Elementen wurde ein Hydrophon platziert. Die verwendete Messtechnik ist in Abschnitt II.1.1 beschrieben. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 18 dargestellt.



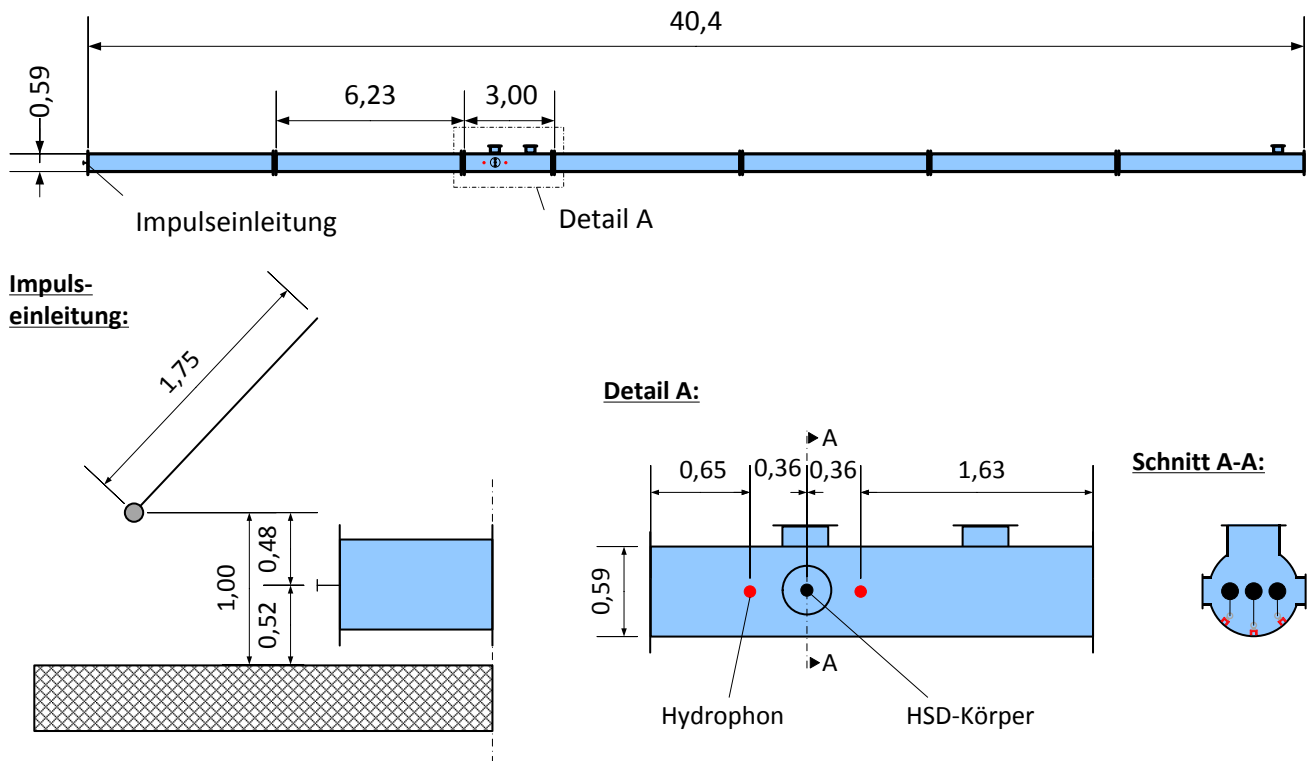


Abbildung 18: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Elementen im Rohr

Als Hydroschallereignis wird ein Stoßimpuls verwendet, welcher an einer der Stirnseiten des Rohres eingeleitet wird. Zur Eliminierung möglicher Einflüsse des Stahlrohres wurde eine Impulseinleitung konstruiert und gefertigt, durch welche ein Impuls direkt auf das Wasser ausgeübt werden kann (s. Abbildung 19). Um reproduzierbare Signale zu erzeugen, wurde der Impuls mit einem Pendel erzeugt, welches bei jedem Versuch gleich ausgelenkt wurde.



Abbildung 19: Impulseinleitung am Druckrohr

Die Impulseinleitung besteht aus einer Stahlplatte, die im eingebauten Zustand einen umlaufenden Spalt von 2,5 mm zur Rohrwand ( $\varnothing$  59 cm) lässt. Die Platte selbst ( $\varnothing$  58,5 cm) ist mit einem Bolzen verschraubt, der druckwasserdicht nach außen geführt ist. Der Impuls wird mit einem auf

den Bolzen treffenden Pendel erzeugt. Dadurch, dass die Platte nahezu den vollen Rohrdurchmesser ausfüllt, wird die Erzeugung einer möglichst ebenen Wellenfront im Rohr angestrebt.

Durch die Länge des Rohres werden Reflektionen vermieden bzw. kommt die rücklaufende Welle eines Stoßimpulses mit einer so großen Verzögerung am Sensor vor und hinter dem untersuchten HSD-Körper an, dass es zu keiner Beeinflussung der eigentlichen Messung kommt.

Das Pendel besteht aus einer 1,75 m langen Stange, an deren Ende eine Stahlkugel befestigt ist. Die Gesamtmasse beträgt 1,83 kg, das Pendel wird 48 cm über den Einleitungsbolzen ausgelenkt.

HSD-Körper und Hydrophone (Detail A in Abbildung 18) wurden zunächst nahe der Impulseinleitung und bei späteren Versuchen in weiterer Entfernung angeordnet.

Die untersuchten Körper bzw. Elementanordnungen wurden bei Wasserdrücken zwischen 0 bar und 3 bar (in Schritten von 1 bar) beprobt. Jeder Versuch wurde jeweils fünfmal bei gleichen Randbedingungen wiederholt.

Zur Auswertung der Versuche werden für jedes Hydroschallereignis der SEL, der  $L_{\text{peak}}$  und das Terzspektrum an jedem Sensor bestimmt. Von eigentlichem Interesse ist hier jedoch das Differenzspektrum zwischen Hydrophon 1 und Hydrophon 2 und die maßgeblich gedämpften Frequenzen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das zunächst an Hydrophon 1 ankommende, unbeeinflusste Hydroschallereignis durch die HSD-Elemente gedämpft wird und an Hydrophon 2 das gedämpfte Hydroschallereignis aufgezeichnet wird. Für ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis sind die Signalausschnitte so zu wählen, dass keine Reflektionen der rücklaufenden Welle in die Bestimmung des SEL in den einzelnen Terzen einfließen. Zur Ermittlung der Differenzspektren wurden jeweils die Mittelwerte der fünf Schallereignisse eines Versuches für jede Terz ermittelt.

Wie in Abbildung 20 an den Terzspektren von Referenzmessungen zu sehen ist, zeigt sich eine gute Reproduzierbarkeit im Frequenzbereich bis etwa 2.000 Hz.

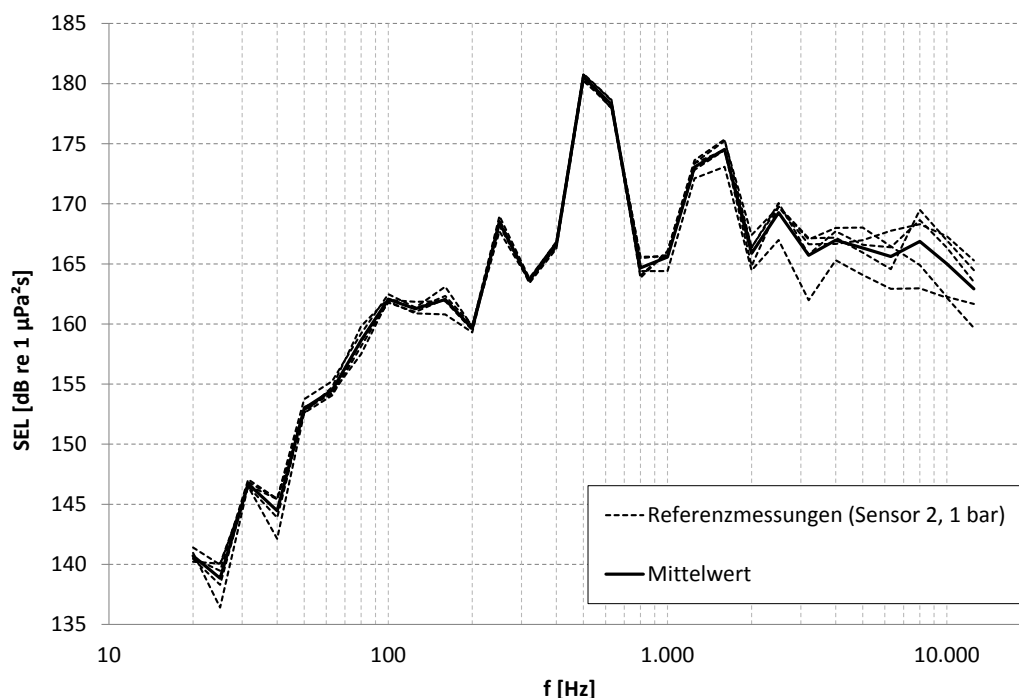
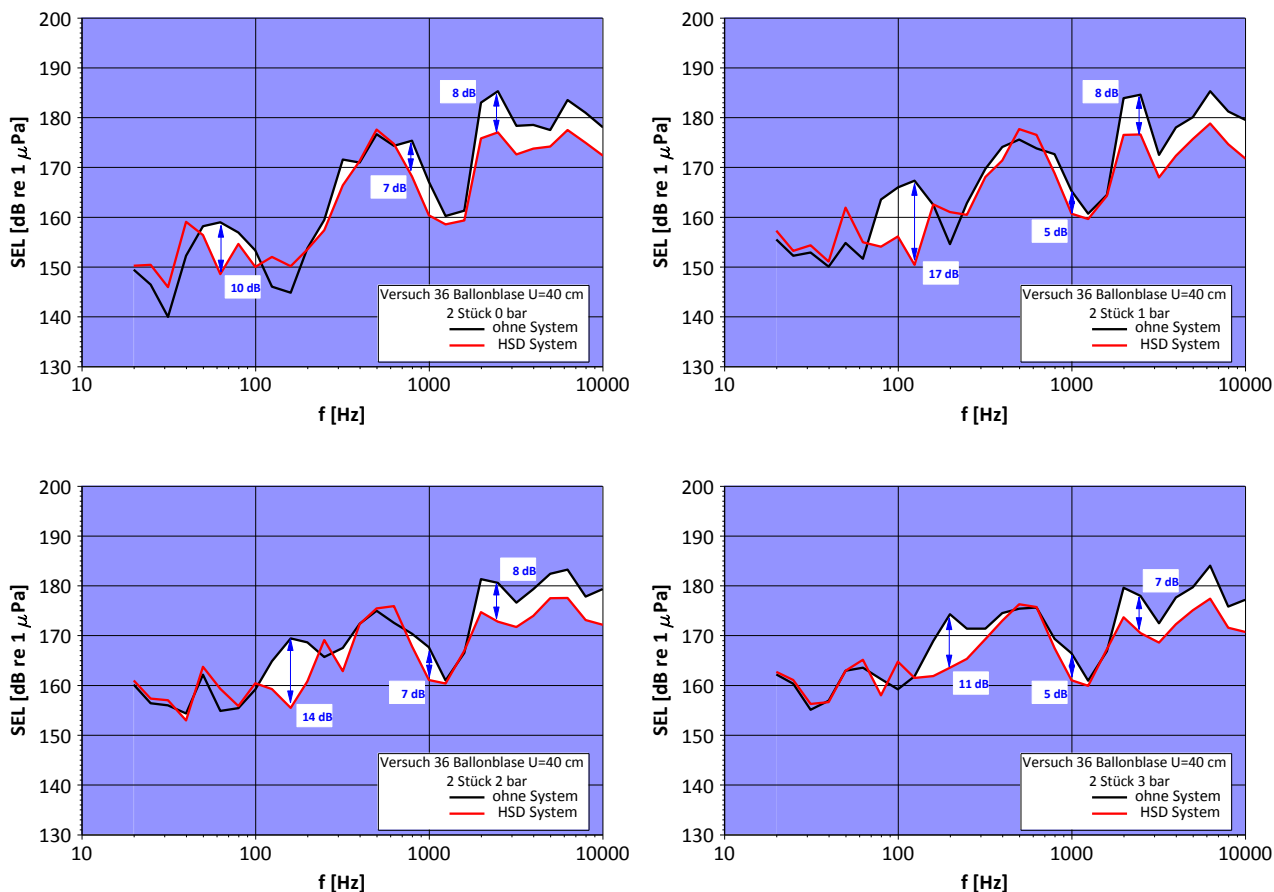


Abbildung 20: Terzspektren von Referenzmessungen im Versuchsrohr ohne HSD-Elemente bei 2 bar an Hydrophon 2 bei 5 Einzelimpulsen (gestrichelt) und gemitteltes Terzspektrum (durchgezogen)

Abbildung 21 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Versuchsreihe 36 bei verschiedenen hydrostatischen Drücken. Es wurden zwei Ballblasen mit einem Umfang von je 40 cm als HSD-Elemente eingesetzt. Es zeigen sich Dämpfungseffekte in drei Frequenzbereichen, welche sich mit steigendem hydrostatischen Druck zu höheren Frequenz hin verschieben.



**Abbildung 21: Terzspektren von Versuch 36 (2 Ballblasen, 40 cm Umfang) im Versuchsrohr bei 0 bar (oben links), 1 bar (oben rechts), 2 bar (unten links) und 3 bar (unten rechts)**

Die Ergebnisse aller Versuchsreihen befinden sich in Anhang A. Neben den Terzspektren analog zu Abbildung 21 sind dort die eingesetzten HSD-Körper und deren Anordnung im Rohr abgebildet sowie die Frequenzbereiche der jeweils maßgeblichen Dämpfungswirkung zusammengefasst.

Tendenziell lässt sich bei allen Elementen feststellen, dass die Dämpfungswirkung mit steigendem hydrostatischem Druck zurückgeht und die gedämpften Frequenzbereiche sich in Richtung höherer Frequenzen verschieben. Beide Effekte sind auf die verringerte Größe der einzelnen Elemente bei höherem Wasserdruck zurückzuführen. Kleinere Elemente haben zum einen ein geringeres Volumen bzw. eine geringere projizierte Fläche, was den Rückgang der einzahligen Dämpfungspegel erklärt. Zum anderen ist die Eigenfrequenz kleinerer Elemente höher, woraus die Verschiebung der Dämpfungsspektren resultiert.

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchen im Druckrohr. Spalte 3 gibt Auskunft darüber, ob Probekörper und Sensorik nah an der Impulseinleitung (vorn) oder in weiter Entfernung (Mitte) angeordnet waren (s.o.). Des Weiteren sind die Anzahl n und das Gesamtvolumen V der HSD-Elemente angegeben. Rechts ist die resultierende Reduzierung des SEL durch die eingesetzten HSD-Körper bei verschiedenen hydrostatischen Drücken ausgewiesen. Der farbliche

Hintergrund kennzeichnet qualitativ die Größe der Schallminderungswirkung im Versuch (grün → hohe Schallminderung, rot → geringe Schallminderung).

Tabelle 5: Übersicht Versuchsergebnisse HSD-Elemente im Druckrohr

#	Körper	Position Versuch	n [-]	V [cm³]	Δ SEL [dB]			
					0 bar	1 bar	2 bar	3 bar
01	Neopolen®	vorne	4	5655	5,1	3,6	3,4	4,3
04	Latexballon	vorne	3	3451	6,2	5,1	4,6	5,9
05	SR11	vorne	20	1950	8,5	9,1	8,9	9,7
07	SR55	vorne	24	2340	10,3	8,6	7,8	8
08	Schlauch, 25 cm	vorne	1	5041	9,2	5,5	6	6,6
09	SR42	vorne	24	2340	9,8	8,6	8,3	8,6
10	SR110	vorne	24	2340	8,9	9,1	7,8	8,2
11	SR220	vorne	40	2197	10,6	9,1	8,6	8,7
12	SR18	vorne	24	2340	11,4	7,6	8,4	9,2
13	SR28	vorne	24	2340	10,6	7,3	8,4	8,5
14	Ballblase (Gummi), 16 cm	vorne	1	2145	7,1	5,7	7	7
15	Ballblase (Kautschuk), 16 cm	vorne	3	2091	7	5,1	7,1	7,4
16	Ballblase (Gummi), 11 cm	vorne	3	2091	7,1	6	5,6	5,8
17	Nudel (normal)	vorne	8	1858	7,8	6	7,7	7,3
18	Schlauch, 25 cm	vorne	1	891	6,9	5	6,2	6,8
19	Nudel (groß)	vorne	4	1583	8,1	5,8	7,8	7,8
20	Nudel (hohl)	vorne	12	2194	8,7	7,2	8,9	9
21	Nudel (klein)	vorne	32	1583	8,1	6,2	7,6	6,7
22	Schwamm	vorne	1	3960	9,5	8	9,8	9,3
23	Nudel (normal)	Mitte	8	1858	6,1	3,7	3,9	4,5
24	Neopolen®	Mitte	4	5655	6,5	4,2	4,8	4,1
30	Nudel (normal)	Mitte	10	2323	5,9	6,4	5,4	5,5
31	Nudel (klein)	Mitte	18	891	5,6	5,3	5,7	5,7
32	Nudel (kurz)	Mitte	30	679	5,7	5,2	5,6	5,7
33	SR18	Mitte	18	1755	6,4	6,2	6,2	6
34	Neopolen®	Mitte	4	5655	5,5	5	5,6	5,1
35	Nudel (div)	Mitte	14	4442	7,8	6,4	5,7	6
36	Ballblase	Mitte	2	2301	5,3	5,4	4,6	4,4

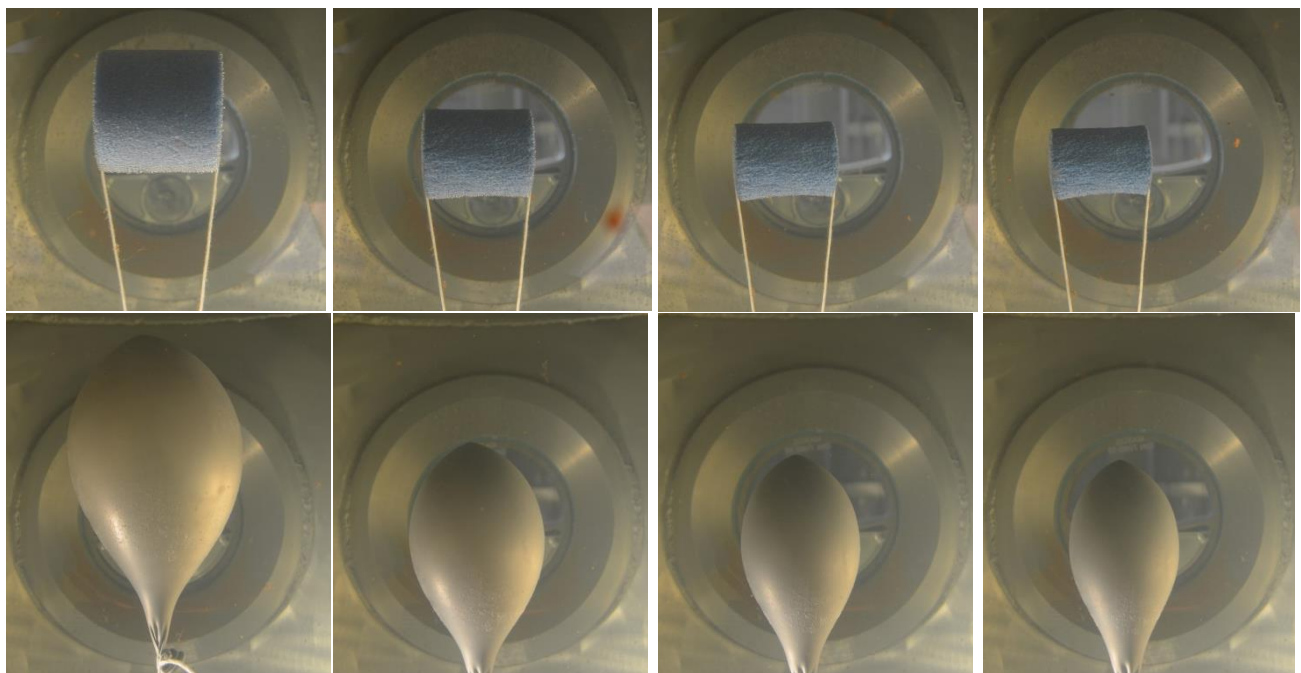
## II.1.5 Laboruntersuchungen Druckkessel

Zur Bestimmung des Verformungsverhaltens der HSD-Elemente unter hydrostatischem Druck in für die Errichtung von OWEA üblichen Wassertiefen wurden die Elemente in einer Druckzelle mit Drücken bis 30 kPa (3 bar bzw. ca. 30 mWS) beaufschlagt. Die Zelle war dabei vollkommen mit Wasser gefüllt, sodass über den Zu- und Ablauf von Wasser aus einem Ausgleichsbehälter auf die Volumenänderung der HSD-Elemente geschlossen werden kann.

Folgende Elementarten wurden untersucht:

- Ballon (Latex)
- Ballblasen (Gummi, Kautschuk)
- Polyethylen-Schaum (EPE), Schwimmnudeln
- Polyurethan (PUR), Sylomer®, verschiedene Steifigkeiten
- Polypropylen-Schaum (EPP), Neopolen®

Abbildung 22 zeigt beispielhaft die visuelle Volumenveränderung eines Schaumstoffelementes und eines Latex-Ballons bei Erhöhung des hydrostatischen Druckes von 0 bar auf 3 bar in Schritten von jeweils 1 bar.

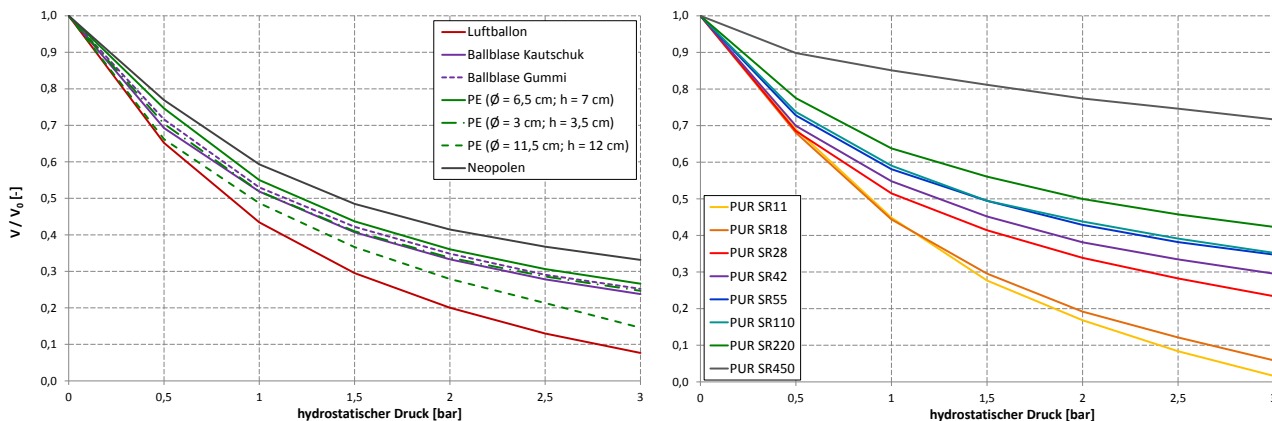


**Abbildung 22: Formänderung von Nudeln (oben) und Latex-Ballons (unten) bei steigendem hydrostatischem Druck (von links nach rechts)**

In Abbildung 23 ist die Volumenänderung verschiedener untersuchter HSD-Elemente unter hydrostatischem Druck dargestellt. Dabei wird das Elementvolumen  $V$  in Bezug zum Ausgangsvolumen  $V_0$  gesetzt. Der Druck wurde sukzessive bis auf 3 bar erhöht und wieder abgelassen, die Volumenänderung wurde beim Druckauf- und -abbau erfasst. Bei den Polyurethan-Elementen, welche aus Schaumstoffmatten verschiedener Steifigkeiten ausgeschnitten wurden, zeigt sich erwartungsgemäß ein starker Einfluss der Materialsteifigkeit (Abbildung 23, rechts). Im linken Teil der Abbildung ist das Druck-Volumen-Verhalten jener Elemente aufgezeigt, die tatsächlich in HSD-Netzen einge-



setzt wurden. Es zeigt sich, dass es bei Polyethylen (Schwimmnudeln) einen geringen Einfluss der Elementgeometrie auf die Kompressibilität unter hydrostatischem Druck gibt (grüne Linien). Die Volumenänderung von Ballblasen bewegt sich insgesamt im gleichen Bereich (lila Linien), Neopolen-Elemente sind etwas steifer (graue Linie) wohingegen die beim ESRA-Test eingesetzten Latexballons unter Druck stärker an Volumen verlieren (rote Linie).

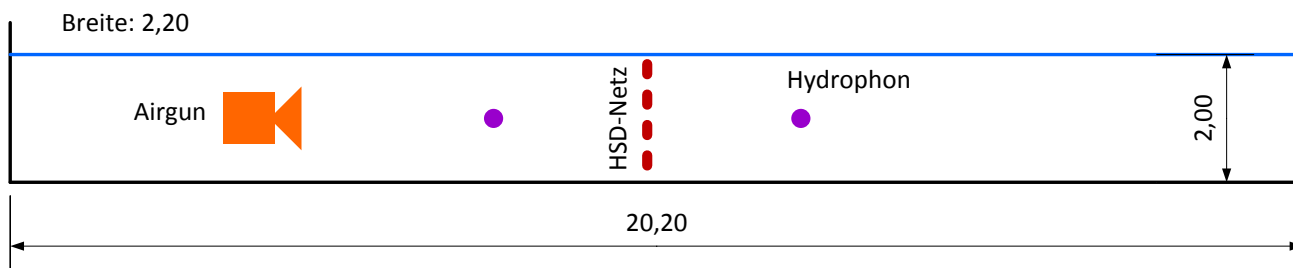


**Abbildung 23: Druckabhängigkeit des Volumens von HSD-Elementen**

Diese Untersuchungen stellen die Grundlage für die im Vorfeld eines Offshore-Einsatzes durchzuführenden Auftriebsberechnungen dar (vgl. Tabelle 9). Für das gewählte Netzlayout wurde der Auftrieb der HSD-Körper über die Wassertiefe (z.B. in 1 m-Schritten) bestimmt und die notwendige Masse der Ballastierung bestimmt. Die Berechnung wurde für verschiedene Szenarien durchgeführt, um das Absinken des Netzes und unterschiedliche Wassertiefen zu erfassen (vgl. Abschnitt II.3).

### II.1.6 Untersuchungen im Stahltrög

Zur Untersuchung des Dämpfungsverhaltens ganzer HSD-Netze wurde ein am IGB-TUBS vorhandener Stahltrög mit Wasser geflutet und verschiedene HSD-Netze mit Abmessungen von 2 m mal 2 m in den Trög gehängt. Mit einer Airgun wurde ein sehr lautes und impulsartiges Hydroschallsignal erzeugt, welches vor und hinter dem Netz aufgezeichnet wurde. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 24 dargestellt.



**Abbildung 24: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Netzen im Stahltrög (Vertikalschnitt)**

Airguns werden z.B. für seismische Erkundungen im Meer eingesetzt und erzeugen eine kurzzeitigen Druckimpuls im Wasser, der einem Rammschlag im Gegensatz zu einem Sweep stark ähnelt. Die für die Versuche eingesetzte Airgun konnte vom Institut für Geowissenschaften der Christian-

Albrechts-Universität zu Kiel ausgeliehen werden. Abbildung 25 zeigt die Auswirkungen an der Wasseroberfläche durch den Schuss der Airgun im Stahltrog mit 120 bar.



**Abbildung 25: Schuss der Airgun zur Auslösung eines Hydroschall-Impulses im Stahltrog des IGB-TUBS**

Bei der ersten Versuchsreihe wurden ausschließlich mit Latex-Ballons bestückte Netze verwendet. Die Ballons unterschieden sich dabei im Durchmesser (4 cm, 6 cm und 8 cm). Die Anzahl der Ballons wurde so gewählt, dass die Projektion der von HSD-Körpern bedeckten Fläche bei allen Netzen 5 % der Gesamtfläche entsprach. Aufgrund der annähernden Kugelform der Elemente ergibt sich für die Elemente kleineren Durchmessers auch ein kleineres Gesamtvolumen als für die größeren Elemente (ca. 6,7 l, 10,1 l und 13,5 l). Die verschiedenen Netze sind in Abbildung 26 zu sehen. Zudem wurden Ballons mittlerer Größe untersucht, welche eine doppelwandige Latex-Membran besaßen (Ballon im Ballon).



**Abbildung 26: im Stahltrog untersuchte HSD-Netze mit Latex-Ballons**

Neben den einzelnen Netzen wurden auch alle Netze gleichzeitig eingesetzt, wodurch sich eine Elementdichte von 15 % der Netzfläche ergab. Die Netze wurden mittels einer Stahlschiene und einer Holzkonstruktion vom Boden bis zur Wasseroberfläche aufgespannt, die Breite der Netze füllte den gesamten Querschnitt des Trogs aus (vgl. Abbildung 27).



**Abbildung 27: HSD-Netz mit Latex-Ballons unter Wasser im Stahltrog**

Bei jedem Versuch wurden zehn Schüsse mit der Airgun abgefeuert und der SEL sowie der  $L_{\text{peak}}$  vor und hinter dem Netz bestimmt. Die Abweichung bei den einzelnen Schüssen lag dabei sowohl für den SEL als auch für den  $L_{\text{peak}}$  bei unter 1 dB, die Schallereignisse sind damit sehr gut reproduzierbar.

Zur Ermittlung der Dämpfungswirkungen der verschiedenen Netze wurde vor Beginn der Versuchsreihen eine Referenzmessung ohne HSD-Netz durchgeführt. Für die Auswertung der Einzelversuche wurde jeweils der Mittelwert aus zehn Schüssen am hinter dem Netz befindlichen Sensor vom entsprechenden Mittelwert der Referenzmessung abgezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

**Tabelle 6: Ergebnisse der Versuche mit HSD-Netzen mit Latex-Ballons im Stahltrog**

HSD-Körper	Netzdichte [%]	Ø [cm]	$L_{\text{peak}}$ [dB]	SEL [dB]	$\Delta L_{\text{Peak}}$ [dB]	$\Delta \text{SEL}$ [dB]
Referenz	-	-	207,2	181,1	-	-
Latex-Ballon, groß	5	8	198,0	171,9	9,2	9,2
Latex-Ballon, mittel	5	6	197,0	171,1	10,2	10,0
Latex-Ballon, doppelt	5	6	200,1	173,3	7,1	7,8
Latex-Ballon, klein	5	4	195,1	169,7	12,2	11,4
Latex-Ballon, versch.	15	4..8	182,0	160,1	25,2	21,0

Es zeigt sich, dass bei gleicher Netzdichte und geringerem Gesamtvolumen viele kleine Elemente eine bessere Dämpfungswirkung erzielen als wenige große Elemente. Beim Vergleich der mittelgroßen Ballons (Ø 6 cm) mit einfacher und doppelter Membran fällt auf, dass die doppelte Membran offenbar einen negativen Einfluss auf die Dämpfungswirkung hat. Es ergibt sich ein Rückgang von etwa 2 dB (SEL). Einen starken positiven Effekt hat eine Erhöhung der Netzdichte auf den dreifachen Wert im letzten Versuch durch Kombination aller Netze. Dies resultiert in einer Erhöhung der Dämpfungswirkung um ca. 10 dB (SEL).

In einer zweiten Versuchsreihe wurden Latex-Ballons und verschiedene Schaumstoffelemente untersucht. Es wurden drei verschiedene Geometrien von Schaumstoffelementen verwendet, die alle aus Schwimmnudeln hergestellt wurden. Zudem wurden vorgefertigte Schaumstoffkugeln eingesetzt. Außerdem wurden Latex-Ballons verwendet, die bereits einige Zeit lagerten, sowie im Vergleich dazu neue Ballons. Bei allen Netzen wurden HSD-Elemente eines Typs verbaut. Die sechs getesteten Netze sind in Abbildung 28 zu sehen.





Abbildung 28: im Stahlrog untersuchte HSD-Netze mit kleinen kurzen Nudeln (oben links), kleinen langen Nudeln (oben mittig), großen Nudeln mit Loch (oben rechts), alten Latex-Ballons (unten links), neuen Latex-Ballons (unten mittig) und Schaumstoffbällen (unten rechts)

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe sind in Tabelle 7 dargestellt. Aus der Referenzmessung ist ersichtlich, dass die Versuche unter vergleichbaren Randbedingungen durchgeführt wurden wie zuvor.

Tabelle 7: Ergebnisse der Versuche mit HSD-Netzen mit verschiedenen Elementen im Stahlrog

HSD-Körper	Höhe [cm]	Ø [cm]	$L_{\text{peak}}$ [dB]	SEL [dB]	$\Delta L_{\text{peak}}$ [dB]	$\Delta \text{SEL}$ [dB]
Referenz	-	-	207,8	182,2	-	-
Nudeln (kurz)	3,5	3,5	190,1	176,0	17,7	6,2
Nudeln (klein)	7	3,5	190,4	175,9	17,4	6,2
Nudeln (hohl)	7	6,8/3,5	195,7	174,5	12,1	7,6
Latex-Ballon (alt)			191,0	176,8	16,8	5,4
Latex-Ballon (neu)			188,7	174,7	19,1	7,4
Schaumstoffbälle	-	6,5	188,3	174,0	19,5	8,2

Bei allen Netzen ergeben sich Pegelreduzierungen in der gleichen Größenordnung um 18 dB ( $L_{\text{peak}}$ ) und 7 dB (SEL). Lediglich das Netz mit Elementen vom Typ Nudel (hohl) stellt mit einer Reduzierung des  $L_{\text{peak}}$  von nur 12 dB eine Ausnahme dar, der SEL jedoch wird mit ca. 8 dB vergleichsweise gut gemindert. Auch die Schaumstoffbälle zeigen eine gute Schallminderungswirkung, sogen sich jedoch im Verlauf des Versuches mit Wasser voll und sind daher für einen längeren Einsatz ungeeignet.

### II.1.7 Untersuchungen im Großen Wellenkanal (GWK)

Zur Untersuchung größerer Netze und der Verminderung von Randeinflüssen waren Versuche im GWK vorgesehen. Der GWK hat eine Länge von etwa 300 m, eine Breite von 5 m und eine Tiefe von 7 m. Er dient in erster Linie der Durchführung großmaßstäblicher Versuche zur Untersuchung der Wirkung von Wellen auf Bauwerke und Teile von Bauwerken wie z.B. Böschungen, Uferbefestigungen, Tragstrukturen für OWEA, Kolkenschutzsysteme. Dazu verfügt er über eine Vorrichtung zur Erzeugung von Wellen unterschiedlicher Wellenperioden und Amplituden.

Bei Versuchen des IGB-TUBS im Rahmen des HSD-Vorhabens wurden mit Latex-Ballons, Ballblasen und Nudeln bestückte HSD-Netze im GWK getestet. Latexballons und Ballblasen hatten in vorherigen Versuchen ein gutes Schallminderungspotential gezeigt, Nudeln erschienen im Hinblick auf die Offshore-Bedingungen besonders robust. Wellen wurden bei den Versuchen im GWK nicht erzeugt. Hydroschallsignale wurden mit Lautsprechern (Sweep) und einer Airgun (Impuls) generiert, vor und hinter den Netzen wurden Hydrophone zur Aufnahme der Hydroschallereignisse positioniert (vgl. Abbildung 29).

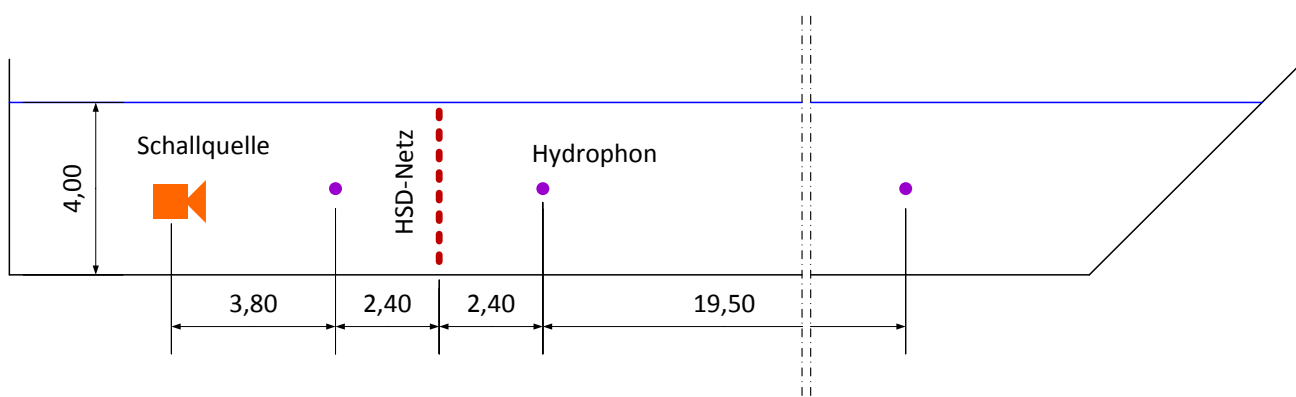


Abbildung 29: Skizze Versuchsaufbau zur Untersuchung von HSD-Netzen im GWK

Abbildung 30 zeigt drei untersuchte Netze mit verschiedenen Elementen. Es wurden Netze mit Latex-Ballons mit 5 % und 10 % Netzdicke, ein Netz mit Ballblasen auch Naturkautschuk bei 10 % Netzdicke sowie ein Netz mit HSD-Körpern aus EPE (Schwimmnudeln) eingesetzt. Bei der Versuchsdurchführung stellte es sich als schwierig heraus, die Netze vom Boden des GWK und zu beiden Rändern des Beckens gleichmäßig aufzuspannen.



Abbildung 30: im GWK untersuchte Netze mit Latex-Ballons (links), mit Ballblasen (unter Wasser, Mitte) sowie mit Schwimmdudeln (rechts)

Es wurden fünf Wiederholungen jedes Versuchs durchgeführt. Tabelle 8 zeigt jeweils die gemittelten Werte der Spitzenpegel und der Einzelereignispegel sowie die Pegeldifferenzen im Vergleich zur Referenzmessung am Hydrophon hinter dem HSD-Netz.

**Tabelle 8: Ergebnisse der Versuche mit HSD-Netzen im GWK, Impulsanregung mittels Airgun**

HSD-Körper	h [cm]	Ø [cm]	Netzdichte [%]	L <sub>peak</sub> [dB]	SEL [dB]	ΔL <sub>peak</sub> [dB]	ΔSEL [dB]
Referenz	-	-	-	202,6	177,0	-	-
Latex-Ballons	-	5	10	189,7	167,4	13,0	9,6
Latex-Ballons	-	5	5	191,3	168,1	11,3	8,9
Ballblasen (Naturkautschuk)	-	16	10	196,8	171,5	5,8	5,5
Nudeln	7	6,8		191,2	167,0	11,4	10,0

Beim Vergleich der Netze mit unterschiedlichen Dichten an Latex-Ballons zeigt sich ein Einfluss der Erhöhung der Netzdichte von 5 % auf 10 %, wenn auch weniger deutlich als beim Versuch im Stahl-trog (vgl. Tabelle 6). Die Ballblasen erreichen deutlich geringere Schallreduktionen. Dies könnte auf den größeren Durchmesser und die damit verbundene Resonanzwirkung in tieferen Frequenzen im Vergleich zu den Latex-Ballons zurückzuführen sein. Nudeln zeigen eine ähnliche Schallminderungswirkung wie Latex-Ballons.

### II.1.8 Dauerhaftigkeit

Die für den Bau des Prototyps verwendeten Komponenten sind der reine Stahlbau (Ballast-Box und Schwimmring), Fischernetze (Träger- und Covernetze), verschiedene Hebezeuge (Stahlseile, Schluppe, Leinen, Schäkel, etc.) sowie die HSD-Elemente (Schaumstoff-Körper und Ballblasen aus Gummi). Stahl wird im Offshore-Bereich vielseitig eingesetzt. Korrosion ist ein Thema, welchem durch Beschichtungen oder Abrostungszuschläge begegnet wird. Für Fischernetze stellen die Bedingungen ebenfalls kein Problem dar. Hebezeuge und Anschlagmittel sind ebenfalls in der Seefahrt verbreitet. All diese Komponenten spielen daher bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit keine Rolle.

Beim Einsatz von Schaumstoffen und andere Kunststoffen für HSD-Elemente ist das Material verschiedenen Beanspruchungen aus der Umwelt ausgesetzt. Dies betrifft zum einen die Haltbarkeit für die Dauer eines Projektes an der Seeluft, unter UV-Einstrahlung und im Meerwasser. Hinzu kommt eine Vielzahl von Druckwechseln zwischen 1 und 3 bar infolge des Einsatzes des HSD-Systems im Rahmen mehrerer Pfahlrammungen. Hierbei ist es wichtig, dass die Elemente ihre schalldämmenden Eigenschaften nicht verlieren.

Schon bei der Fertigung von HSD-Netzen auf dem Instituts-Parkplatz konnte festgestellt werden, dass bestimmte Ballblasen nicht UV-beständig sind und bei Sonneneinstrahlung in kurzer Zeit zerplatzen. Auch bei UV-beständigen Blasen ist über einen gewissen Zeitraum ein Volumenverlust

durch Diffusion zu beobachten. Ferner kommt es bei der Handhabung großer Netze zu mechanischen Beanspruchungen, welche insbesondere dünnwandige Ballons zum Platzen bringen.

Im Rahmen des Laborprogramms wurden HSD-Elemente mehreren Druckwechseln von 30 kPa (3 bar) ausgesetzt. Jeweils vorher und nachher wurde die Schallminderungswirkung mittels des in Abschnitt II.1.3 beschriebenen Versuchsaufbaus ermittelt.

In Abbildung 31 sind die Terzspektren von Nudeln und Neopolen®-Elementen zu sehen, welche im Druckkessel für einen Zeitraum von dreimal 24 h einem Druck von 3 bar ausgesetzt wurden und danach jeweils im Betonbecken mittels einer Sweep-Anregung untersucht wurden.

Eine Belastung von 3 bar über 72 h entspricht 24 Einsätzen bei Offshore-Rammungen bei einer geschätzten Rammdauer von 3 h je Pfahl. Bei visueller Betrachtung der Elemente fällt eine zunehmende Volumenverkleinerung sowie Einschnürung im mittleren Bereich des Elementes auf.

Bei den Neopolen®-Elementen (Abbildung 31, unten) ist kein signifikanter Einfluss der Druckwechsel auf das Dämpfungsverhalten zu erkennen. Die Nudeln (Abbildung 31, oben) zeigen im Frequenzbereich um 200 Hz eine Verbesserung des Dämpfungsverhaltens mit den ersten beiden Druckwechseln, ähnlich der Abhängigkeit des Dämpfungsverhaltens von Sylomer®-Körpern von der Materialsteifigkeit (vgl. Abbildung 17). Es ist möglich, dass die Nudeln bei Druckbeanspruchung in einem gewissen Rahmen an Steifigkeit verlieren, was sich auf das Resonanzverhalten auswirkt.

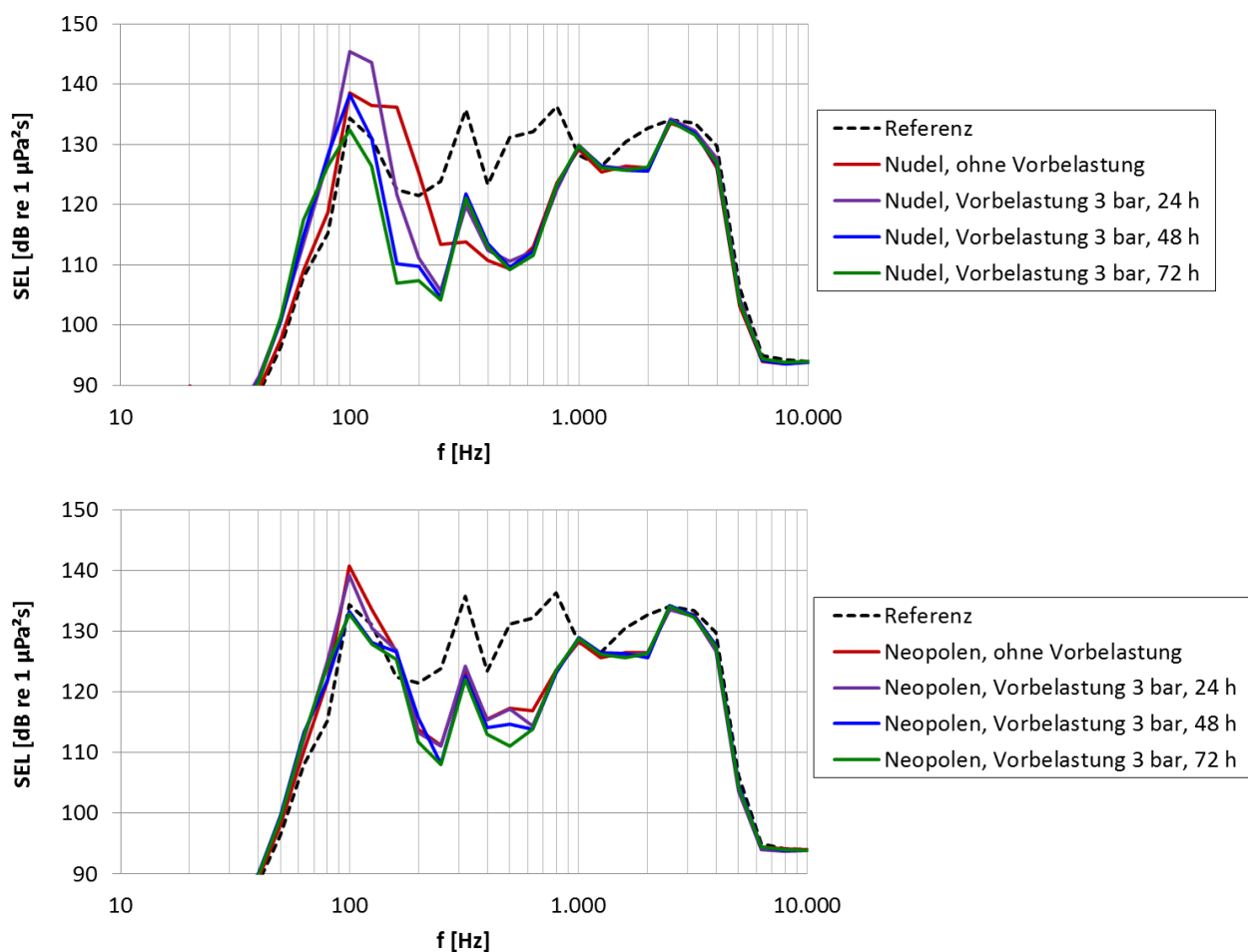


Abbildung 31: Terzanalysen von Nudeln (oben) und Neopolen-Körpern (unten) nach mehreren Druckwechseln



Zusätzlich zu den Druckwechseln im Labor wurden verschiedene Elemente untersucht, die weniger kontrollierten, aber realitätsnäheren Umwelteinflüssen wie Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Temperaturschwankungen unterlagen. Gleichzeitig wurde die natürliche Alterung berücksichtigt.

- Elemente vom *ESRa*-Test, die 20 Monate im Freien auf dem Institutsgelände lagerten
- Elemente des HSD-Netzes vom OWP *Amrumbank West* nach Einsatz bei 18 Pfählen

Abbildung 32 zeigt HSD-Elemente aus Polyethylen-Schaum. Das linke Element ist unbenutzt, beim rechten Element zeigen sich Gebrauchsspuren durch den mehrmaligen Einsatz unter Wasser und die allgemeinen Beanspruchungen beim Offshore-Einsatz. Bei visueller und haptischer Untersuchung der Elemente fällt eine Versprödung des Materials auf, evtl. verursacht durch die Herauslösung der Weichmacher.

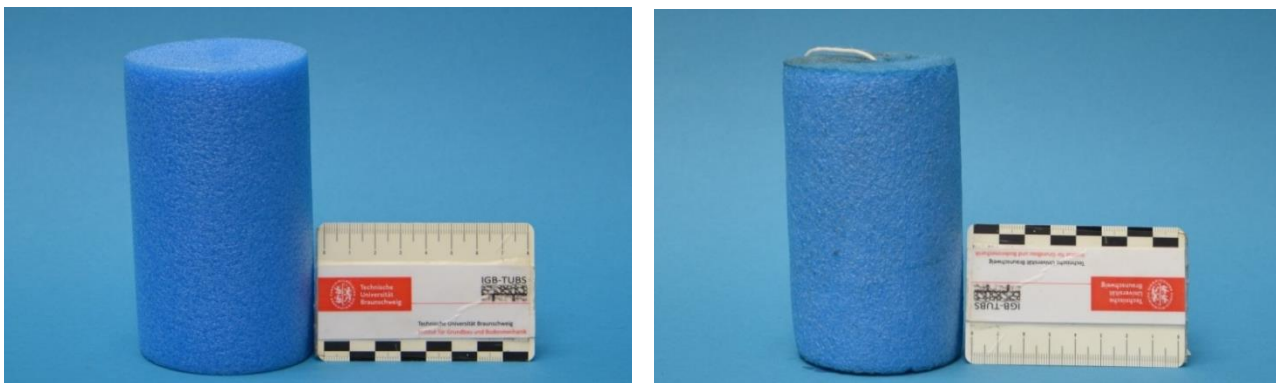


Abbildung 32: HSD-Element vor (links) und nach (rechts) dem Einsatz beim OWP Amrumbank West

Die Elemente wurden ebenso wie die unter Laborbedingungen beanspruchten Elemente beprobt und mit frischen Referenzelementen verglichen. Wie in Abbildung 33 zu sehen ist, gibt es keinen signifikanten Einfluss der Alterung auf das schalltechnische Verhalten der untersuchten Elemente. Im Bereich um 200 Hz ist u.U. sogar eine Verbesserung der Dämpfungswirkung zu erkennen. Einen negativen Einfluss auf die Dämpfungswirkung haben die o.g. Verschleißerscheinungen nicht.

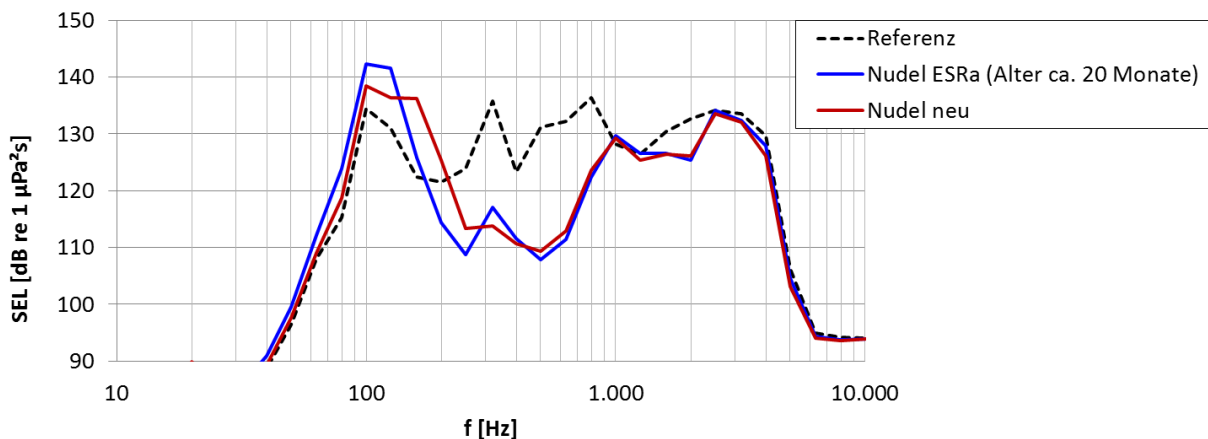


Abbildung 33: Terzspektren von Untersuchungen im Betonbecken an Nudeln vom *ESRa*-Test (blau) und neuen Elementen (rot)

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit weiterer Elemente sind im Anhang B zu den Laborversuchen im Betonbecken enthalten.

## II.1.9 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse des Laborprogramms

Aus den Ergebnissen der Labor- und Technikumsversuche lassen sich die folgenden Erkenntnisse für den Entwurf von HSD-Netzen für den Offshore-Einsatz ableiten:

### Einsatzfähigkeit

- Wahl der Materialien unter dem Gesichtspunkt der Offshoretauglichkeit (Robustheit)
- Druckabhängigkeit des Elementvolumens beeinflusst die Geometrie (Eigenfrequenz) und das Auftriebsverhalten (Design der Ballastierung)

### Dauerhaftigkeit

- augenscheinliche Versprödung der Schaumstoffelemente bei Lagerung im Freien über mehrere Monate
- Volumenverlust der Ballblasen durch Diffusion über mehrere Wochen (Lebensdauer ca. 6 bis 8 Monate)
- Zerstörung von Ballblasen bei fehlender UV-Beständigkeit innerhalb von Stunden

### Dämpfungswirkung

- steigende Dämpfungswirkung bei erhöhter HSD-Elementdichte
- kein wesentlicher Einfluss auf die Dämpfungswirkung durch wiederholte Druckbeaufschlagung (weder positiv noch negativ)
- kein Verlust der Dämpfungswirkung von Schaumstoffelementen durch Versprödung
- Verminderung der Dämpfungswirkung von Ballblasen infolge Volumenverlust (Material muss UV-beständig sein)
- Dämpfung aller getesteter Elemente ist breitbandig im Bereich um die jeweilige Eigenfrequenz wirksam
- Dämpfung der getesteten Elemente verschiebt sich unter Druck zu höheren Frequenzbereichen

### Übertragbarkeit auf Offshore-Netze

- keine quantitative Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Dämpfungswirkung auf Offshorebedingungen aufgrund der Schallcharakteristik (Impulserzeugung) offshore und der Randbedingungen (Geometrie und Randeinflüsse) in den Laborversuchsständen
- Auswahl der Materialien hinsichtlich Offshoretauglichkeit (Robustheit, UV-Beständigkeit)
- Abwägung der HSD-Elementdichte hinsichtlich erforderlicher Dämpfungswirkung einerseits und notwendiger Ballastierung andererseits
- durch Kombination unterschiedlicher Elemente (Material, Geometrie) lassen sich größere Frequenzbereiche abdecken
- Schallminderung kann über Anzahl an Netzlagen und Anzahl der HSD-Elemente frequenzabgestimmt erhöht werden

Zur Bestückung von HSD-Netzen für den Offshore-Einsatz wurden Schwimmnudeln aus EPE gewählt. Diese besitzen günstige Schallminderungseigenschaften und eine hohe Robustheit. Durch die Herstellung von HSD-Elementen verschiedener Größen lassen sich große Frequenzbereiche abdecken. Eine Lücke besteht jedoch in den tiefen Frequenzen, insbesondere unter höherem hydrostatischen Druck.

Für die Dämpfung tiefer Frequenzen wurden Ballblasen ausgewählt. Diese lassen sich hinsichtlich ihrer Größe ähnlich variabel einsetzen wie Latex-Ballons, für verschiedene Durchmesser sind unterschiedliche Blasen erhältlich. Auch hier führen Beschädigungen zur Zerstörung eines Elementes, jedoch sind die Blasen deutlich robuster und erscheinen daher auch offshore einsetzbar. Alternativ können Neopolen®-Elemente eingesetzt werden, die aufgrund der Lieferformate in größeren Abmessungen hergestellt werden können als Nudeln.

## II.2 Numerische Untersuchungen

Zur numerischen Untersuchung der Dämpfungswirkung von HSD-Elementen wurde das Druckrohr (vgl. Abschnitt II.1.4) in der FE-Software ANSYS modelliert. Verschiedene HSD-Körper wurden als ideale Kugeln abgebildet. Sowohl die Rohrwandung als auch die Hülle des HSD-Elementes wurde als elastisches Strukturelement mit drei Freiheitsgraden modelliert. Das Wasser im Rohr sowie die Luft innerhalb des HSD-Körpers wurden als akustische Fluidelemente auch mit einem Freiheitsgrad abgebildet. Die Verknüpfung erfolgte über Interface-Elemente mit vier Freiheitsgraden den nachfolgenden Abbildungen ist die Vernetzung des Druckrohres (Gesamtsystem) mit einem zu untersuchenden HSD-Element zu sehen.

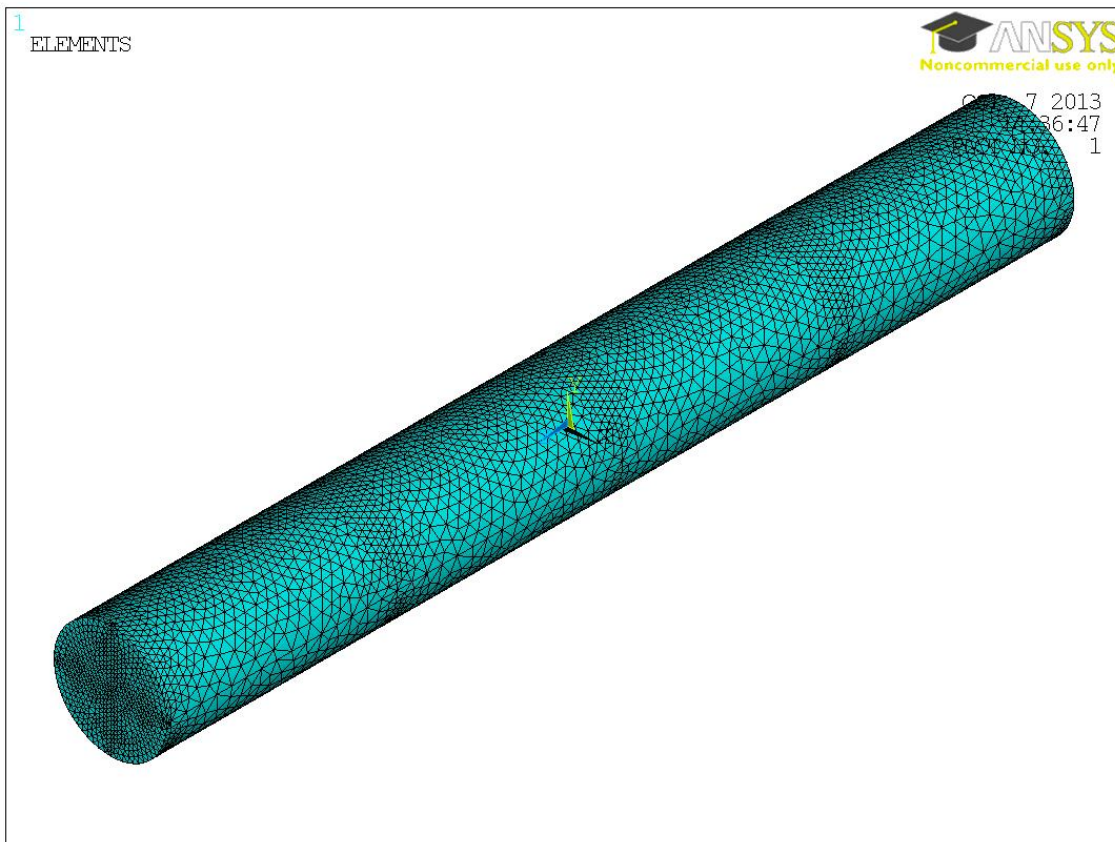


Abbildung 34: Freie Tetraedervernetzung und Darstellung der Festhaltung in Längs- (Rohrende) u. Vertikalrichtung

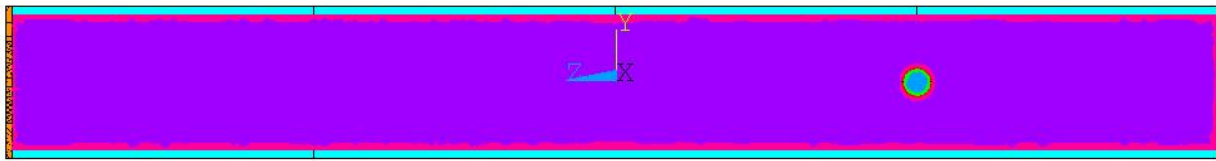


Abbildung 35: Elementansätze am Längsschnitt durch das Rohr und den Ballon: Ballonhülle als Solid186 (türkis), Übergangsbereich Stahl-Wasser u. Wasser-Ballon als Fluid30 Keyopt 1 (rosa), Wasser als Fluid30 Keyopt 0 (lila), Übergangsbereich Ballon-Luft als Fluid 30 K

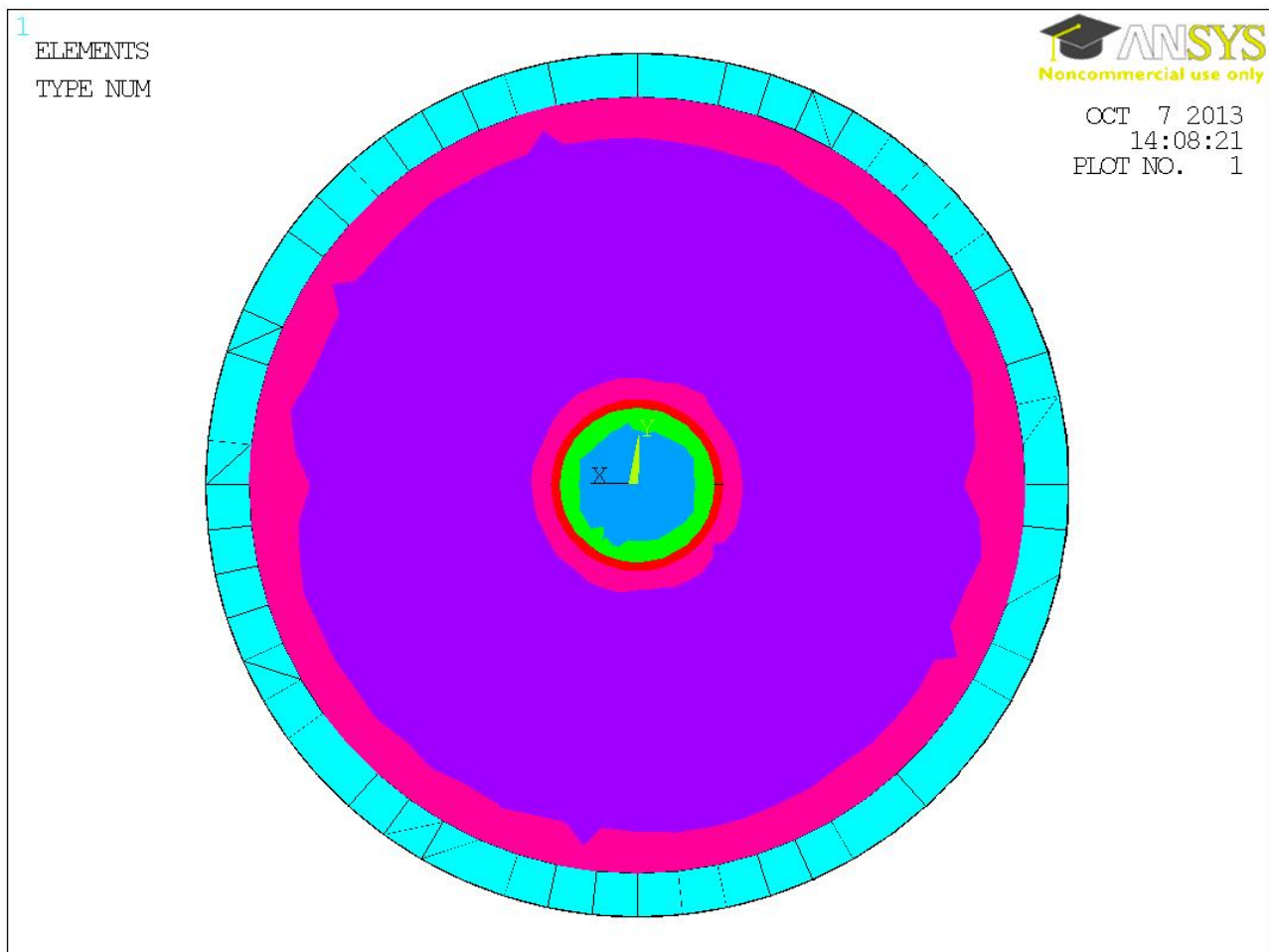


Abbildung 36: Elementansätze am Vertikalschnitt durch den Ballon und das Rohr: Ballonhülle als Solid186 (türkis), Übergangsbereich Stahl-Wasser u. Wasser-Ballon als Fluid30 Keyopt 1 (rosa), Wasser als Fluid30 Keyopt 0 (lila), Übergangsbereich Ballon-Luft als Fluid 30 Keyopt 1 (grun), Luft als Fluid 30 Keyopt 0 (hellblau)

Nachdem das Modell mit den Messergebnissen der Rohrversuche kalibriert worden war, war es möglich, die Auswirkungen von Änderungen hinsichtlich Geometrie, Wandstärke, Material, Luftvolumen und Luftdruck numerisch zu untersuchen sowie die Wirkungsweise der Schallminderung als Grundlage für die Beschaffung oder Entwicklung neuer HSD-Elemente zu ermitteln. Darüber hinaus gingen die Berechnungsergebnisse in die Planungen der großmaßstäblichen Versuche im Wellenkanal ein.



Da der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens in der praktischen Umsetzung sowie Anwendbarkeit des HSD-Systems lag und die numerischen Berechnungen damit nur ein Werkzeug zur Zielerreichung darstellen, wird auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse verzichtet. Der Nachweis der Praxistauglichkeit erfolgte auf der Basis der Laboruntersuchungen und der in situ Tests.

## II.3 Offshore-Tests

### II.3.1 Entwicklung und Bau eines Prototyps

#### Idee

Für den Pilot-Einsatz von HSD bei einer Offshore-Rammung war die Entwicklung eines Systems vorgesehen, welches nach dem gleichen Prinzip funktioniert wie das HSD-System beim *ESRa*-Test: Ein mit HSD-Elementen besetztes, schlauchförmiges Netz wird über den zu rammenden Pfahl gestülpt und über die Höhe der Wassersäule aufgespannt. Gegen den Auftrieb der HSD-Elemente ist das Netz am unteren Ende ausreichend zu ballastieren, die HSD-Elemente streben nach oben und spannen das Netz auf.

Eine ringförmige Ballast-Box sollte den nötigen Abtrieb zum Aufspannen des HSD-Netzes bis zum Boden gewährleisten und das Netz zusätzlich während Transport und Lagerung des Systems fassen. Das HSD-Netz war am unteren Ende mit der Ballast-Box zu verbinden. Das Netz sollte mit verschiedenartigen HSD-Elementen bestückt werden. Um ein möglichst gleichmäßiges, kreisförmiges Aufspannen des Netzes über die gesamte Wassertiefe zu gewährleisten und ein Anlegen des Netzes an den Pfahl durch die Strömung zu vermeiden, sollte das Netz in regelmäßigen Abständen an Distanzringen befestigt werden. Diese sorgen durch eine massive Bauart für zusätzlichen Abtrieb, sodass nicht der gesamte Auftrieb am unteren Ende des Netzes von der Ballast-Box aufgenommen werden muss.

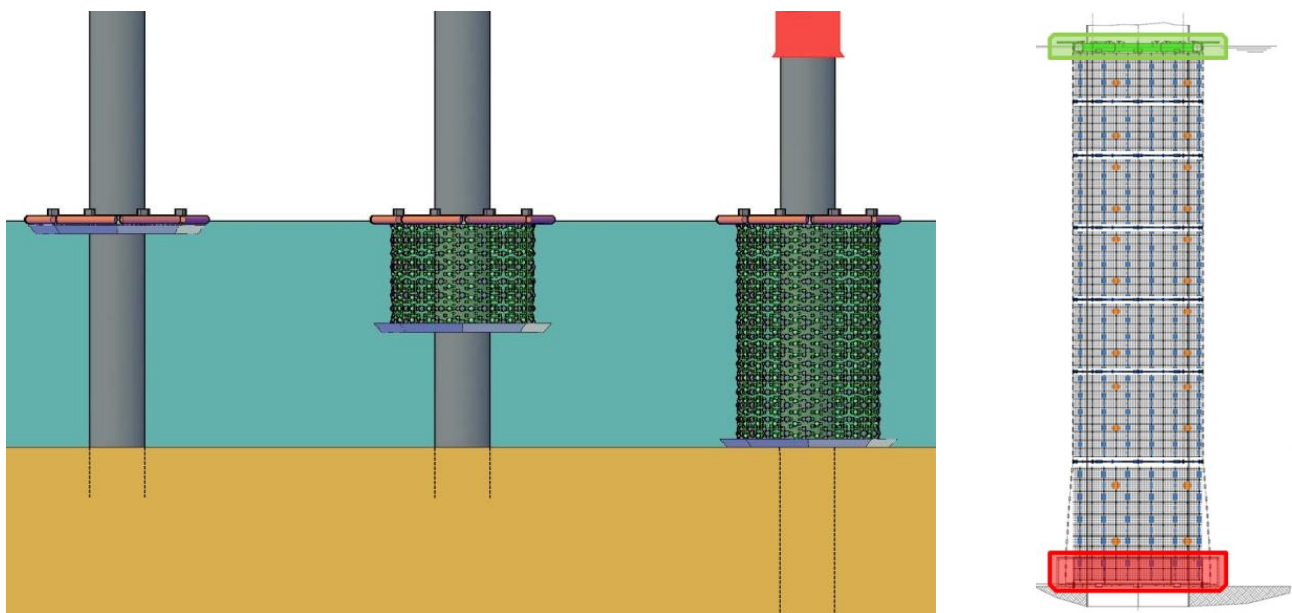


Abbildung 37: Prinzip Einsatz HSD-System [Bruns, 2011] (links), Konzept des HSD-System mit Ballastbox (rot), Distanzringen (schwarz) und Schwimmring (grün) für den Einsatz beim OWP London Array (rechts)

Das HSD-System sollte ohne externe Antriebe funktionieren und für den Einsatz keine Stromzufuhr oder Hydraulik-Verbindung benötigen. Der Einsatz muss durch den Hauptkran des Installationsschiffes erfolgen, das Aufspannen des Netzes erfolgt allein über Auf- und Abtriebskräfte im Wasser. Tragseile zur Aufnahme des Systems wurden an der Ballast-Box befestigt und liefen innerhalb des Netzes durch die Distanzringe zu einer Traverse, die am Kranhaken anzuschlagen war. Die Traverse sollte an Deck abgelegt werden, sobald die Ballast-Box auf den Meeresboden abgesenkt wurde, sodass der Kran für die eigentlichen Rammarbeiten zur Verfügung stehen würde.

In Absprache mit dem Verbundpartner *ABJV* sollte das System beim OWP *London Array* eingesetzt werden. Hier wurden Monopfahl-Gründungen installiert. Zur Führung der Pfähle während der Rammung wurde ein Pile-Gripper (s. Abbildung 38) verwendet, welcher zu Beginn der Rammung den Einsatz des HSD-Systems wie oben beschrieben über den Kran nicht zuließ. Ein Anbau des Systems an den Gripper war im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht realisierbar. Aus diesem Grund sollte das HSD-System über den Pfahl gehoben werden, sobald dieser von allein stand und der Gripper zurückgezogen werden konnte.



**Abbildung 38: Pile-Gripper zur Führung der Monopfähle (links) und Errichterschiff beim Einfädeln eines Pfahles in den Pile-Gripper (rechts)**

#### Anforderungen von ABJV:

Neben den üblichen Anforderungen an Nachweise und Zertifizierungen für Schweißnähte, Hebezeuge u.ä., welche insbesondere im Offshore-Bereich eine große Bedeutung haben, gab es seitens des Projektes einige technische und logistische Anforderungen an das System. Diese betrafen zum einen die möglichst störungsfreie Integration des HSD-Einsatzes in den Bauablauf und zum anderen Vorkehrungen, um im Fall von Fehlfunktionen am System die übrigen Arbeiten fortsetzen zu können. Dazu war es notwendig, eine Bedienungsanleitung für den Prototyp zu erstellen, die in Anhang C einzusehen ist.

Es war zu vermeiden, dass der Hammer in Kontakt mit dem HSD-System oder dem HSD-Netz kommt. Die Pfähle wurden bis unter die Wasseroberfläche gerammt und auch der Hammer tauchte in das Wasser ein. Der Durchmesser und die Formbeständigkeit des Netzes waren zu gering, als

dass der Hammer innerhalb des Netzes hätte geführt werden können. Ein Herausheben des HSD-Systems kurz vor Ende der Rammung hätte einen erheblichen Zeit- und damit Kostenaufwand bedeutet, da dazu der Hauptkran benötigt worden wäre und der Hammer abgeschlagen und später wieder angeschlagen hätte werden müssen. Die Lösung zu diesen Anforderungen bestand in der Absenkung des HSD-Netzes. Dazu wurde am oberen Ende des Netzes ein Schwimmring aus Stahl vorgesehen, welcher geflutet werden kann, dadurch absinkt und das HSD-Netz mit nach unten drückt. Das Fluten wurde über ein Ventil an einem Hydraulikschlauch gesteuert, welcher an Deck gezogen werden konnte (hierfür musste nur das Ventil geöffnet werden, es war kein Zuführen von Druckluft erforderlich).

Bedenken bestanden von Seiten des Projektes, dass sich das System am Pfahl verkanten oder im Boden stecken bleiben könnte. Dies hätte nicht unbedingt die Installation des Pfahles beeinträchtigt, jedoch hätten die weiteren Arbeiten an der Gründungsstruktur und der gesamten Anlage verhindert oder zumindest verzögert werden können. Um in jedem Fall den Schwimmring und das HSD-Netz bergen zu können, wurde ein Mechanismus entwickelt, um das Netz am unteren Ende von der Ballast-Box zu lösen. Zudem wurden am Schwimmring Tragseile befestigt, über welche der Ring herausgehoben werden konnte, falls die an der Ballast-Box angeschlagenen Tragseile hätten gekappt werden müssen. Die Ballast-Box sollte im Fall einer Havarie des Systems zumindest zerteilt werden, da sie nach Installation der Gründungsstruktur nicht mehr über den Pfahl hätte gehoben werden können. Zu diesem Zweck wurde die Box in zwei Hälften gefertigt und über Bolzen verbunden. Die Bolzen wiederum können über Stahlseile mit einem Kran herausgezogen werden, sodass die Box in zwei Teile zerfällt. Zum Erreichen der Auslöser der Notfall-Einrichtungen waren Messenger-Leinen vorgesehen.

Das geforderte Absenken des Schwimmringes sowie die Notfall-Einrichtungen am System bedingten einen zusätzlichen Aufwand bei Planung und Konstruktion des Systems. Für das Handling von Hydraulikschlauch und Messenger-Leinen war zusätzliches Personal beim Einsatz des Systems erforderlich.

Um zu vermeiden, dass sich HSD-Elemente vom Netz lösen und ins Meer gelangen konnten, wurden auf der Außen- und Innenseite zusätzlich Cover-Netze mit geringerer Maschenweite vorgesehen. Lösten sich dann HSD-Elemente vom Trägernetz, wurden diese von den Cover-Netzen zurückgehalten und konnten nicht in die Umwelt gelangen.

### Auftriebsberechnung

Beim Einsatz des HSD-Systems ist zu gewährleisten, dass die Masse der Ballast-Box ausreicht, das Netz unter Wasser zu ziehen. Sinkt die Box weiter, wird kontinuierlich der Auftrieb eines größeren Teiles des Netzes wirksam. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass das Volumen der HSD-Elemente druckabhängig ist und unter Wasser mit steigendem hydrostatischem Druck abnimmt (vgl. Abbildung 23). Beim Eintauchen einer ausreichenden Netzlänge wird wiederum der Abtrieb eines weiteren Distanzringes wirksam. Bei voll ausgefahrenem Netz darf der Abtrieb der mit dem Netz verbundenen Distanzringe nicht so groß werden, dass auch der Schwimmring unter Wasser gezogen würde. Durch das Fluten des Schwimmringes muss wiederum der Abtrieb des Ringes ausreichen, das Netz von oben her unter Wasser zu ziehen.

In Tabelle 9 ist beispielhaft die Auftriebsberechnung für ein Netz mit 33 m Länge beim Einsatz in maximaler Wassertiefe dargestellt.

Tabelle 9: Auftriebsberechnung (Beispiel)

Szenario 1											
Wassertiefe 33 m											
Netzlänge		Volumenverhalten			Netzdichte			Auftrieb			
Wasser- tiefe [m]	Hydrostati- scher Druck [bar]	Nudeln [%]	Neo- polen [%]	Ball- blase [%]	Nudeln [%]	Neo- polen® [%]	Ball- blase [%]	Volumen in Netz [m³/m²]	pro Fläche [kg/m²]	pro lfd. m [kg/m]	kumu- liert [kg]
1	0,1	94	95	93	100	50	50	0,0133	13,33	480	480
2	0,2	89	90	86	100	50	50	0,0125	12,51	450	930
3	0,3	83	85	81	100	50	50	0,0118	11,75	423	1.353
4	0,4	79	81	75	100	50	50	0,0110	11,04	397	1.751
5	0,5	74	76	70	100	50	50	0,0104	10,38	374	2.124
6	0,6	70	73	66	100	50	50	0,0098	9,77	352	2.476
7	0,7	66	69	62	100	50	50	0,0092	9,20	331	2.808
8	0,8	62	66	58	100	50	50	0,0087	8,68	313	3.120
9	0,9	59	63	55	100	50	50	0,0082	8,20	295	3.415
10	1,0	56	60	51	100	50	50	0,0078	7,76	279	3.695
11	1,1	53	57	49	100	50	50	0,0074	7,36	265	3.960
12	1,2	50	55	46	100	100	100	0,0086	8,61	310	4.270
13	1,3	48	52	44	100	100	100	0,0082	8,20	295	4.565
14	1,4	46	50	42	100	100	100	0,0078	7,82	281	4.846
15	1,5	44	49	40	100	100	100	0,0075	7,47	269	5.115
16	1,6	42	47	38	100	100	100	0,0072	7,16	258	5.373
17	1,7	40	45	37	100	100	100	0,0069	6,88	248	5.620
18	1,8	38	44	36	100	100	100	0,0066	6,62	238	5.859
19	1,9	37	43	34	100	100	100	0,0064	6,39	230	6.089
20	2,0	36	41	33	100	100	100	0,0062	6,17	222	6.311
21	2,1	35	40	32	100	100	100	0,0060	5,98	215	6.526
22	2,2	34	39	31	100	100	100	0,0058	5,79	209	6.734
23	2,3	33	38	30	100	150	150	0,0067	6,70	241	6.976
24	2,4	32	38	30	100	150	150	0,0065	6,50	234	7.210
25	2,5	31	37	29	100	150	150	0,0063	6,32	227	7.437
26	2,6	30	36	28	100	150	150	0,0061	6,13	221	7.658
27	2,7	29	35	27	100	150	150	0,0059	5,94	214	7.872
28	2,8	28	35	26	100	150	150	0,0057	5,74	207	8.078
29	2,9	27	34	25	100	150	150	0,0055	5,54	199	8.278
30	3,0	27	33	23	100	150	150	0,0053	5,32	191	8.469
31	3,1	26	32	22	100	150	150	0,0051	5,08	183	8.652
32	3,2	25	32	21	100	150	150	0,0048	4,82	174	8.826
33	3,3	24	31	19	100	150	150	0,0045	4,54	163	8.989
Netz an Netzbox		25	32	21	100	150	150	0,0048	4,82	333	9.323
<b>Gesamtauftrieb [kg]</b>										<b>9.323</b>	

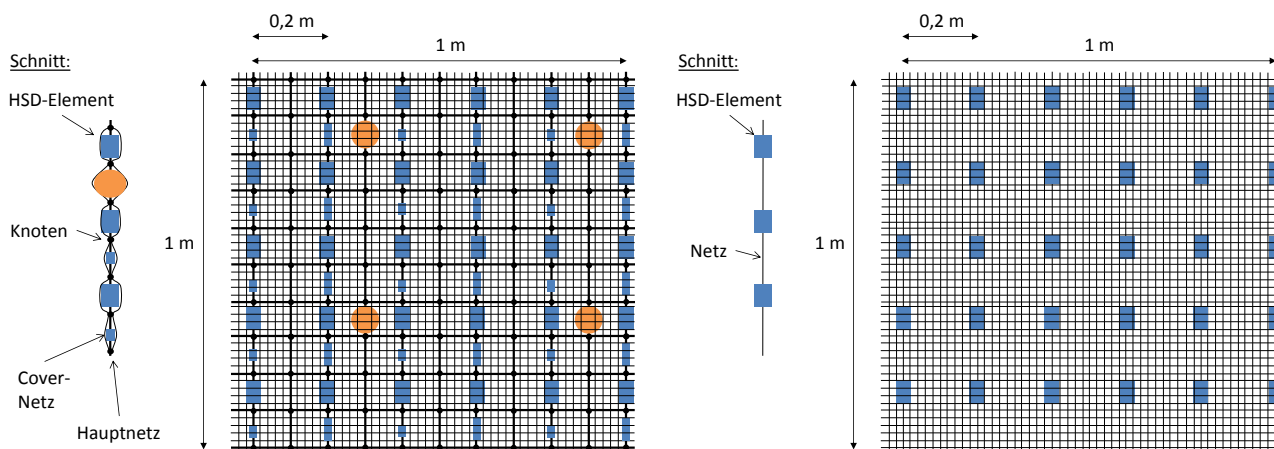
In den beiden linken Spalten ist das Netz in Abschnitte von 1 m Länge eingeteilt, denen jeweils eine Wassertiefe und der daraus resultierenden hydrostatische Druck zugeordnet wird. In den nächsten drei Spalten ist das Volumenverhalten der eingesetzten HSD-Elemente bei entsprechenden Druck zu sehen (vgl. auch Abbildung 23). Die Netzdicke gibt an, wie viele der verschiedenen HSD-Körper im Netz angebracht sind. In diesem Beispiel ist zu sehen, dass der Anteil der größeren Neopolen®-Elemente und der Ballblasen mit der Tiefe zunimmt. In der vierten Spalte von links ist das Gesamtvolumen an HSD-Elementen pro Quadratmeter Netz infolge der Geometrie und Anzahl der verwendeten Elemente sowie des Volumenverhaltens und der Netzdicke angegeben. Hieraus lässt sich wiederum der Auftrieb pro Quadratmeter Netz, unter Berücksichtigung des Netz-Umfangs der Auftrieb je Meter Netzlänge und schließlich der Gesamt-Auftrieb des Netzes berechnen, den die Ballast-Box aufnehmen muss.

Die Auftriebsberechnung erfolgte für unterschiedliche Wassertiefen jeweils iterativ für verschiedene Eintauchtiefen der Ballast-Box bzw. des Schwimmrings und ist im Handbuch zum HSD-System in Anhang C enthalten.

### Bau Prototyp

Das beim Offshore-Test eingesetzte HSD-Netz wurde am IGB-TUBS gefertigt. Dazu wurden HSD-Elemente verschiedener Größe an einem Trägernetz mit einer Maschenweite von 10 cm befestigt. Auf Grundlage der Erfahrungen beim *ESRa*-Test sowie der ersten Ergebnisse der im Labor und im GWK durchgeführten Versuche wurde das Netzlayout entwickelt. Beim *ESRa*-Test waren Schaumstoffelemente einer Größe verwendet worden, welche auf eine Eigenfrequenz von 120 Hz abgestimmt waren. Grundsätzlich wirken HSD-Elemente sehr breitbandig um ihre jeweilige Eigenfrequenz. Es lässt sich feststellen, dass größere Elemente wegen einer niedrigeren Eigenfrequenz tiefere Frequenzen besser dämpfen als kleinere Elemente. Mit den beim *ESRa*-Test eingesetzten Elementen konnten im Bereich 100 Hz bis 500 Hz Dämpfungswirkungen von etwa 20 dB (SEL) erreicht werden (vgl. Abbildung 56, rechts).

Zur Verbesserung der Dämpfungswirkung wurde das Netzlayout aufbauend auf dem vom *ESRa*-Test erweitert (vgl. Abbildung 39). Kleinere Elemente sollten die höherfrequenten Terzen (> 1.000 Hz) und größere Elemente die tieffrequenten Terzen (< 100 Hz) reduzieren. Außerdem wurden Ballblasen im Netz angeordnet (orange).



**Abbildung 39: Netzlayout Prototyp London Array (links) im Vergleich zum *ESRa*-Test (rechts)**



Aufgrund der Druckabhängigkeit der Elementgeometrie und des oben dargestellten Zusammenhangs zwischen Elementgröße und gedämpfter Frequenzen wurden im unteren Bereich des Netzes verstärkt größere Elemente eingesetzt, um auch hier noch effektiv tiefe Frequenzanteile des Rammschalls mindern zu können.

Das Rohmaterial für die Elemente konnte im Handel bezogen werden, die Anpassung der Geometrie erfolgte in der Werkstatt des IGB-TUBS.

Die Stahlkonstruktion bestehend aus der Ballast-Box, den Distanzringen und dem Schwimmring sowie die Trageile und Anschlagmittel wurde in Zusammenarbeit mit *der Bilfinger Berger Maschinenteknik (BBMT)* entworfen. Die einzelnen Teile wurden in Vlissingen/NL (Basishafen des OWP London Array) montiert (vgl. Abbildung 40). Der Einbau des Netzes und der finale Zusammenbau des Netzes und aller Anschlagmittel erfolgten durch das IGB-TUBS, unterstützt durch ABJV. Hierbei wurden auch die Notfall-Vorrichtungen getestet.

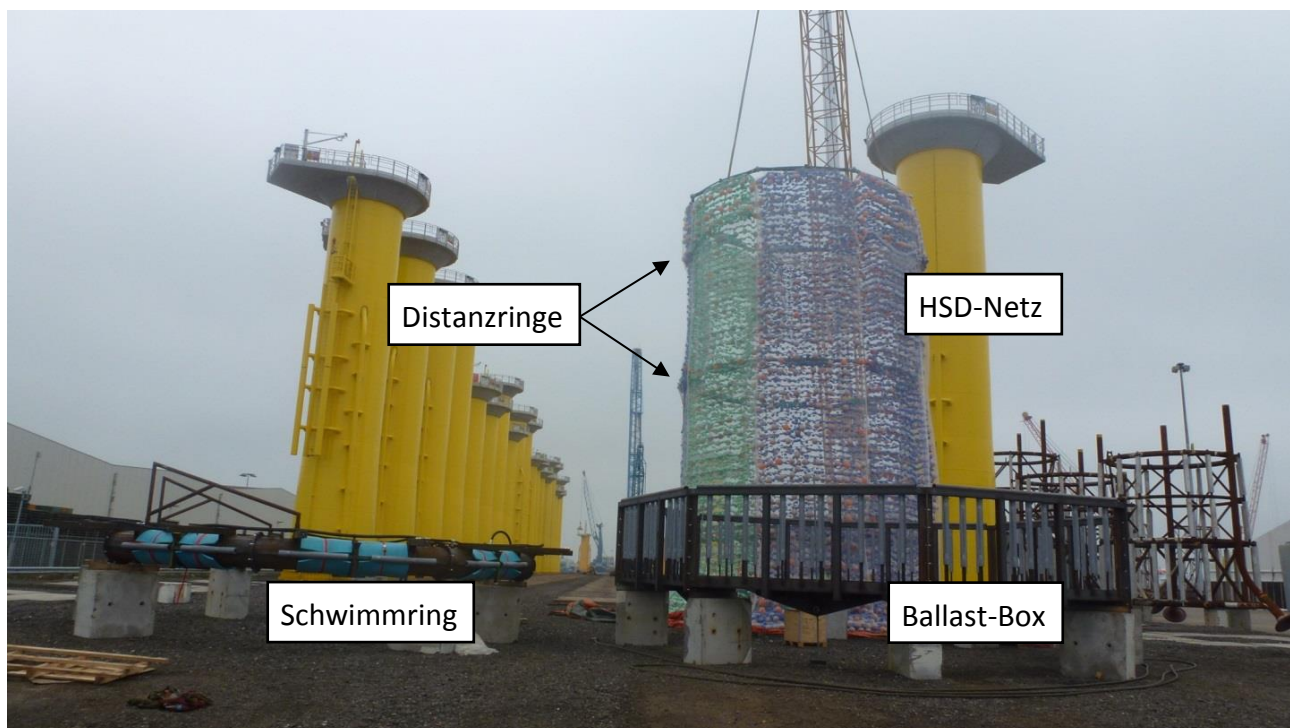


Abbildung 40: HSD-System beim Zusammenbau im Basishafen Vlissingen/NL

### II.3.2 Hafentests und Systemoptimierung

Um offshore die Funktionstüchtigkeit des HSD-Systems sicherzustellen und insbesondere Zwischenfälle zu vermeiden, wurde das HSD-System im Vorfeld des Offshore-Testes im Hafenbecken getestet. Hierzu wurde die fertige Konstruktion am 07.06.2012 an die Kaikante transportiert. Das System sowie das Rigging wurden so vorbereitet, wie es später an Deck des Errichterschiffes geschehen sollte. Das gesamte System wurde an der Traverse von einem Autokran angehoben und in das Hafenbecken geschwenkt, das Handling der Halteleinen und des Hydraulikschlauches erfolgte wie im Offshore-Einsatz. Das System wurde zu Wasser gelassen, wobei Schwimmring und Netz wie geplant aufschwammen, das Absenken der Ballast-Box erfolgte gesteuert durch den Kran über die Trageile.

Der Hafentest erwies sich als sehr sinnvoll. Beim Auffalten des Systems unter Wasser zerschnitten die Drahtseile zur Auslösung der Notfall-Einrichtungen das Netz. Zusätzlich wurden Teile des Netzes

in Hülsten hineingezogen, durch welche die Haupttragseile an den Distanzringen und dem Schwimmring geführt wurden. Die Führungshülsten wurden dadurch mit den Tragseilen verkeilt. Beim Herausheben des Systems machte sich dies durch eine Schiefstellung des Schwimmringes zwischen den Tragseilen oberhalb der Ballast-Box bemerkbar. Nachdem das System an der Kaikante abgesetzt wurde, konnten weitere Schäden inspiziert werden.

Auf Grundlage der gewonnenen Erfahrungen wurde die Konstruktion verbessert. Dabei wurden Stahlseile durch Texturseile ersetzt, lediglich für die Haupttragseile wurden weiterhin Stahlseile, jetzt aber durch Kunststoffrohre ummantelt, eingesetzt. Die Distanzringe wurden zugunsten eines möglichst einfachen Systemaufbaus aus dem Netz entfernt und der nötige Ballast zusätzlich an der Ballastbox und z.T. am Schwimmring angebracht (s. Abbildung 41). Dies veränderte auch die Auftriebsberechnungen. Die Führungshülsten am Schwimmring wurden durch weniger enge Führungsaugen ersetzt. Das Netz wurde am IGB-TUBS instand gesetzt.

Bei den Arbeiten am Netz fiel außerdem auf, dass die eingesetzten Ballblasen wie oben beschrieben nicht ausreichend UV-beständig waren (vgl. II.1.8). Diese wurden daher gegen Neopolen-Elemente ähnlicher Größe ausgetauscht (vgl. Abbildung 58, rechts).



**Abbildung 41: HSD-System nach der Reparatur: Ballastring und Schwimmring mit angeschweißten Distanzringen (links), Führung für Tragseile (Mitte), in Kunststoffrohr eingezogene Tragseile (rechts)**

Nach Beendigung von Reparaturen und Umbauten wurde das System am 21.06.2012 abermals einem Hafentest unterzogen. Das System wurde mehrmals ohne Zwischenfälle im Hafenbecken abgelassen und wieder hochgezogen (s. Abbildung 42).

Wetterbedingt wurde das Absenken des Schwimmringes auf einen dritten Hafentest am 12.07.2012 verschoben. In diesem Test zeigte sich zwar ein negativer Einfluss der geringen Wassertiefe des Hafenbeckens, jedoch eine grundsätzliche Funktionalität auch dieses Mechanismus, sodass das System für den Offshore-Einsatz freigegeben wurde.





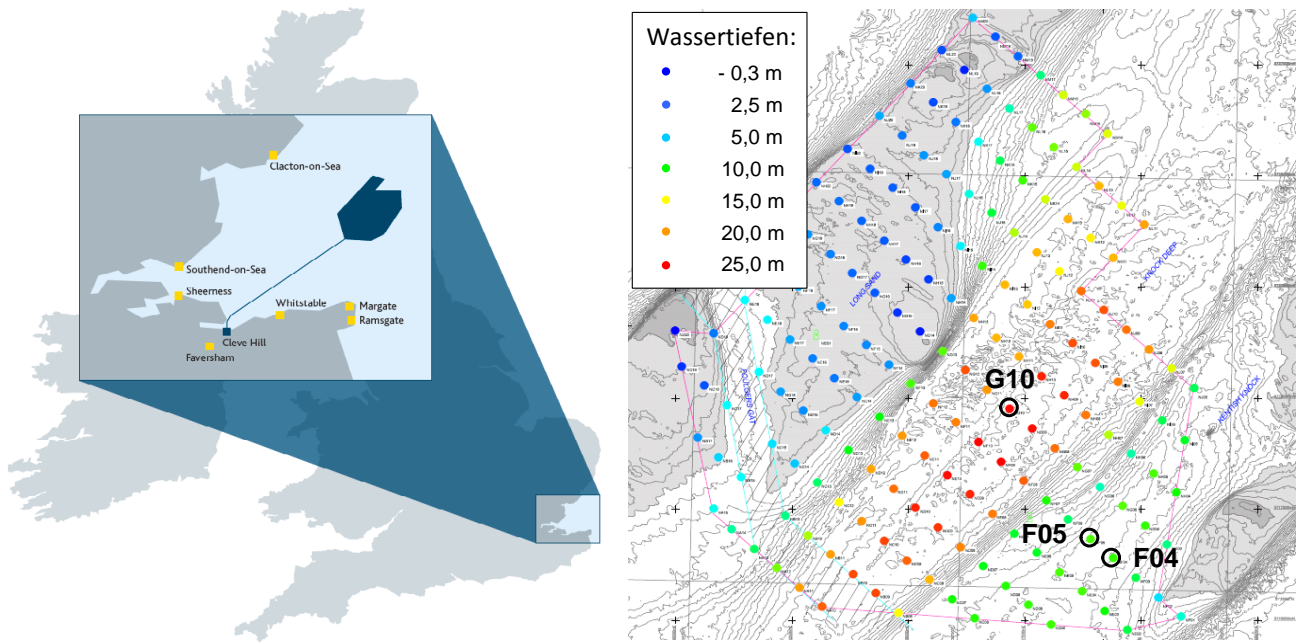
Abbildung 42: HSD-System beim (erfolgreichen) letzten Hafentest: System wird zu Wasser gelassen (links oben), Schwimmring und Teile des Netzes an der Wasseroberfläche (rechts oben), teilweises Absinken des Schwimmringes nach Entlüftung (links unten), HSD-System wird wieder aus dem Hafenbecken gehoben (rechts unten)

### II.3.3 Technische Durchführung Offshore-Test beim OWP *London Array*

#### Projekt *London Array*

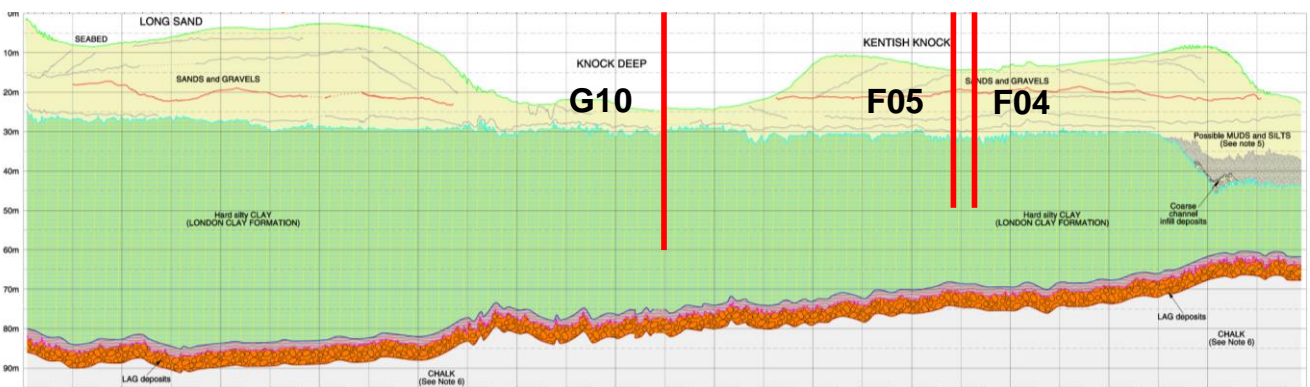
Der OWP *London Array* wurde zwischen März 2011 und Dezember 2012 in der Themse-Mündung vor der Ostküste Englands errichtet (vgl. Abbildung 43, links). Im April 2013 wurde *London Array* als damals größter Windpark mit 175 OWEA in Betrieb genommen. Die Gründung der 3,6 MW-Anlagen in sehr variierenden Wassertiefen (0 bis 25 m, vgl. Abbildung 43, rechts) erfolgte über Monopfähle mit 5,7 m Durchmesser und bis zu 68 m Länge. Die Gründungen wurden von den Hubschiffen *MPI Adventure* und *Sea Worker* sowie dem Schwimmkran *HLV Svanen* installiert. Betreiber des Windparks ist die *London Array Ltd. (LAL)*, eine Gesellschaft mit Beteiligung von *E.ON*, *DONG Energy*, *La Caisse de dépôt et placement du Québec* und *Masdar* [LAL, o.J.]. Die Errichtung der Gründungsstrukturen wurde von *ABJV*, einem Joint Venture aus *Per Aarsleff A/S* und *Bilfinger Berger AG* durchgeführt.





**Abbildung 43: Standort OWP London Array (links) [LAL, o.J.] sowie der Pfähle der Messkampagne innerhalb des Bau-feldes (rechts) [COWI, 2010]**

Der Baugrund beim OWP London Array ist insbesondere hinsichtlich der Ausbreitung von Bodenschwingungen als nicht unproblematisch zu bezeichnen. Unter der marinen Deckschicht stehen Sande und Kiese an. Aufgrund der hydraulischen Verhältnisse in der Themsemündung sind diese lokal zu Dünen aufgetürmt, wodurch sich sehr unterschiedliche Mächtigkeiten der Sande/Kiese zwischen 5 m und 30 m und variierende Wassertiefen ergeben. Darunter steht ein fester, schluffiger Ton an, in den die Pfähle einbinden. Darunter liegende Ablagerungen und Kalke spielen für die Pfahlgründungen keine Rolle. Abbildung 44 zeigt die Baugrundverhältnisse und die Lage der drei im Rahmen des Offshoretests gerammten Pfähle.



**Abbildung 44: Schnitt durch den Baugrund beim OWP London Array mit den drei im Zuge des Offshoretests gerammten Pfählen G10, F05 und F04 [Henke, 2012]**

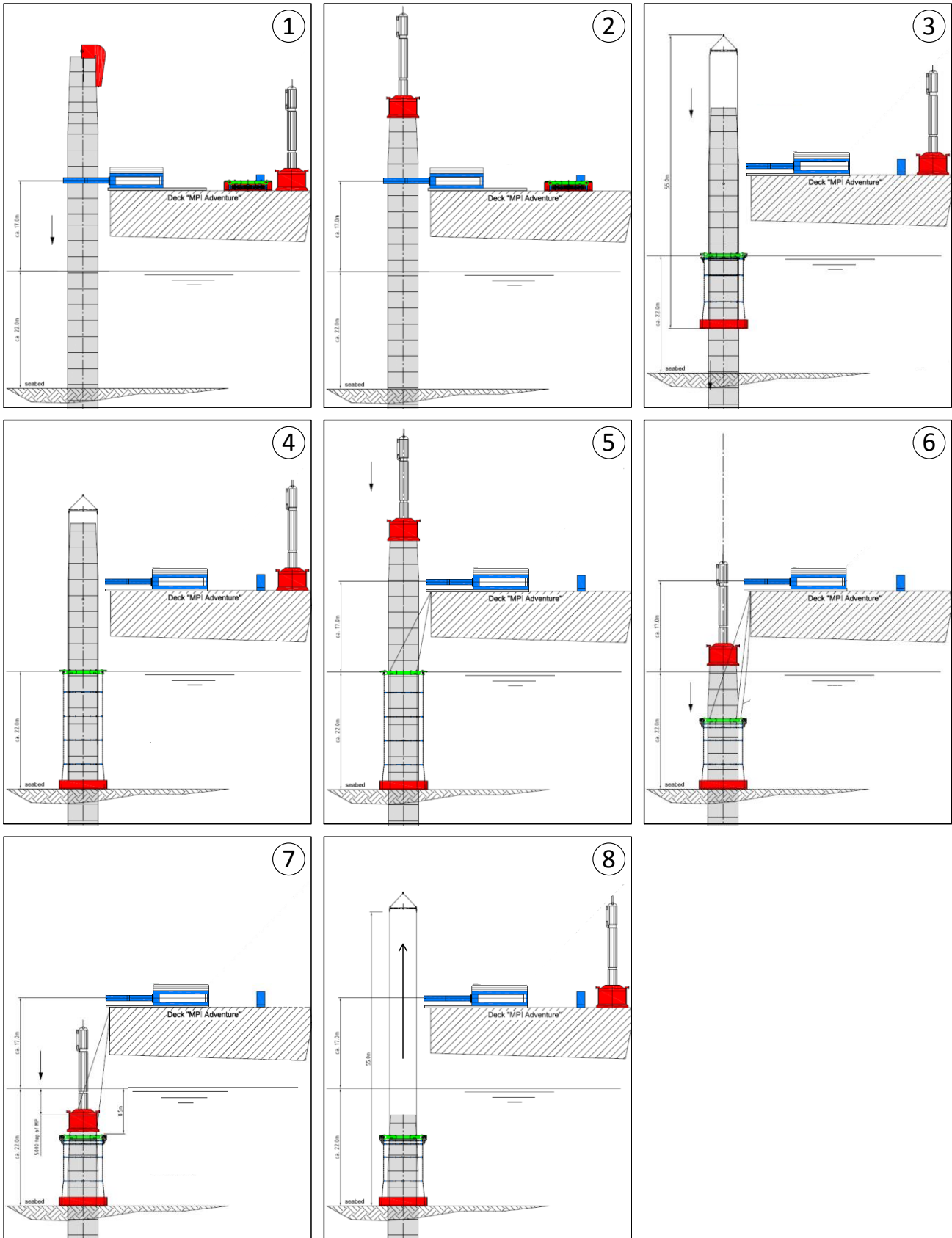
Zur Einbringung der Monopfähle wurde ein Hydraulikhammer vom Typ S-1400 der Fa. IHC Merwede eingesetzt. Schallminderungsmaßnahmen spielten in Großbritannien keine Rolle, zum Schutz mariner Säuger wurden Vergrämungsmaßnahmen und Beobachtungen durchgeführt.

### Einsatz HSD-System

Im Folgenden ist der Einsatz des HSD-System im Installationsablauf beschrieben. Die einzelnen Schritte sind in Abbildung 45 dargestellt.

- ① Der Pfahl wird aufgenommen und positioniert.
- ② Der Pfahl wird in den Boden gerammt und dabei vom Gripper gehalten.
- ③ Sobald der Pfahl von allein steht und der Gripper zurück gefahren werden kann, wird der Hammer abgenommen, das HSD-System vom Kran aufgenommen und über den Pfahl gehoben.
- ④ Das HSD-System wird zu Wasser gelassen bis die Ballast-Box auf dem Boden aufliegt. Die Traverse zur Aufnahme des HSD-Systems wird an Deck abgelegt.
- ⑤ Der Kran kann den Hammer wieder aufnehmen und die Rammung wird fortgesetzt.
- ⑥ Bevor der Hammer die Wasseroberfläche erreicht, wird der Schwimmring geflutet und damit das HSD-Netz abgesenkt.
- ⑦ Der Pfahl wird auf Endtiefe gerammt.
- ⑧ Nach Abschlagen des Hammers hebt der Kran das HSD-System wieder aus dem Wasser.

**Untersuchung und Erprobung von Hydro-Schall-Dämpfern (HSD)  
zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA**



**Abbildung 45: Ablauf Pfahlinstallation mit HSD-Einsatz [Bilfinger Berger Maschinentechnik, 2012]**

Ablauf Offshoretest

Das HSD-System sollte vom Errichterschiff *MPI Adventure* eingesetzt werden, da dieses in den größeren Wassertiefen operierte. Das Schiff fuhr mit jeweils drei Fundamenten bestehend aus Monopfahl und Transition Piece von Vlissingen zum Baufeld. Von Seiten des Forschungsvorhabens wurde das Messschiff *Reykjanes* zur Realisierung der Begleitmessungen gechartert. Die Messungen selbst wurden vom *Institut für Technische und Angewandte Physik GmbH (itap)* durchgeführt.

Ende Juli 2012 wurde schließlich der optimierte Prototyp des HSD-Systems am Basishafen des OWP London Array in Vlissingen auf das Installationsschiff *MPI Adventure* verladen (s. Abbildung 46, links). Im Vorfeld waren neben den technischen Zeichnungen des Systems sowie den Zertifikaten der Hebezeuge Prozedurbeschreibungen für den geplanten Einsatz des Systems erstellt worden (vgl. Anhang C). Aufgrund der im Vergleich zu den übrigen auf dem Installationsschiff vorgehaltenen Gerätschaften kleinen Abmessungen und kompakten Bauform des Systems konnte dieses unter einem der Monopfähle platziert werden (s. Abbildung 46, rechts). Hierzu waren Anschlagpunkte für das Seafastening sowie einige Holzböcke als Auflagerpunkte vorgesehen (s. Abbildung 46, Mitte).



**Abbildung 46: Verladen des HSD-System an Deck des Installationsschiffes (links), Auflagerpunkte (Mitte), geringer Platzbedarf unterhalb der Monopfähle (rechts)**

Während der Vorbereitungen des Offshore-Tests wurden die Pfähle, an denen das HSD-System getestet werden sollte, mehrmals geändert. Letztendlich wurde der Prototyp in einer Ausfahrt mit den Pfählen G10, F05 und F04 eingesetzt. In Tabelle 10 sind die Spezifikation der Pfähle zusammengefasst.

**Tabelle 10: Pfahlspezifikationen des Offshore-Tests**

Pfahl	Länge [m]	Wassertiefe [m]	Einbindetiefe [m]	Datum	Schallschutz
G10	63,8	23..27	39,3	30.07.2012	Referenzmessung
F05	58,5	11..15	39,9	01.08.2012	HSD-Einsatz
F04	59,1	15..18	38,5	03.08.2012	Referenz (HSD abgebrochen)

Der erste Pfahl der vom Forschungsvorhaben begleiteten Ausfahrt, Pfahl G10, wurde planmäßig ohne Schallminderungssystem installiert. Die Messungen an diesem Referenzpfahl waren zur Fest-

stellung des ungeminderten Schallpegels notwendig, zudem sollten so die Abläufe an Bord beobachtet werden, sodass sich die Mitarbeiter des IGB-TUBS besser auf den Einsatz des Prototyps vorbereiten konnten. Beim Pfahl F05 wurde das HSD-System eingesetzt (s. Abbildung 47). Zu Beginn der Rammung kam es zu einem Pile-Run, in dem der Pfahl bei etwa 8 m Einbindung mit einem einzigen Schlag ca. 5 m in den Boden eindrang. Der Grund hierfür war eine Weichschicht im Boden. Der Pfahl wurde bis auf eine Tiefe von etwa 21 m in den Boden gerammt, bevor eine vorübergehende Standsicherheit erreicht war und der Pile-Gripper geöffnet werden konnte. Daraufhin wurde der Hammer an Deck abgelegt und das HSD-System aufgenommen. Nachdem das System ans Heck des Schiffes geschwenkt worden war, konnten die verschiedenen Halteleinen sowie der Hydraulikschlauch übernommen werden. Das Auffädeln des Systems über den Monopfahl nahm einige Zeit in Anspruch, da der Wind das System immer wieder in Bewegung setzte und die Öffnung des Systems nur wenig größer war als der Pfahldurchmesser. Schließlich wurde das System eingefädelt und zu Wasser gelassen. Die Ballast-Box sank zu Boden und entfaltete das HSD-Netz während der Schwimmring wie vorgesehen an der Wasseroberfläche verblieb. Die Traverse zur Aufnahme des HSD-Systems wurde innerhalb des Pile-Grippers abgelegt, die Tragseile hingen schlaff durch.

Der Hammer wurde wieder aufgenommen und die Rammung fortgesetzt. Die Unterbrechung der Rammung zum Einsatz des HSD-Systems dauerte etwa 2:30 h. Bei einer Einbindetiefe des Pfahles von etwa 32 m wurde das Ventil des Schwimmringes geöffnet, sodass die Luft durch den Hydraulikschlauch entweichen konnte. Der Ring sank ab, sodass der Hammer beim Eintauchen ins Wasser nicht mit Teilen des HSD-Systems in Berührung kam. Nach Beendigung der Rammung wurde das HSD-System wieder geborgen und an Deck verstaut, sodass es für einen weiteren Einsatz beim Pfahl F04 zur Verfügung stand. Bergung und Sicherung des HSD-Systems dauerten wiederum 1:30 h. Der zeitliche Ablauf des HSD-Einsatzes ist in Tabelle 11 aufgeführt.

Es ist zu beachten, dass die blau hinterlegten Aktivitäten zum ersten Mal von der Mannschaft durchgeführt wurden und keinerlei Lerneffekte wirksam werden konnten. Die Zeiten sind aufgrund der unterbrochenen Rammung nicht auf zukünftig geplante Einsätze übertragbar, bei denen das HSD-System z.B. am Gripper, am Hammer oder an Rammführungen befestigt werden soll.

Bei der Rammung des Pfahles F04 waren die Wetterbedingungen an der Grenze der Installationsmöglichkeiten und verschlechterten sich mit fortschreitender Dauer. Es wurde dennoch versucht, das HSD-System ein weiteres Mal einzusetzen. Das System wurde wie beim vorherigen Pfahl angeschlagen, über den Pfahl gehoben und zu Wasser gelassen. Aufgrund stärkeren Wellengangs lag das HSD-System weniger ruhig im Wasser. Der Schwimmring schlug stark gegen den Pfahl. Da es sich um einen Prototyp-Test handelte und weder von Seiten des Forschungsvorhabens noch von Seiten des Projektes ein weiterer Einsatz nötig war, wurde entschieden den Einsatz zur Minimierung des Risikos für den weiteren Bauablauf abzubrechen.

### Zusammenfassung technischer Ablauf

Die nötigen Vorbereitungen des Offshore-Tests nahmen deutlich mehr Zeit in Anspruch als geplant. Hierfür können folgende Gründe angeführt werden, die nicht oder nur teilweise im Einflussbereich des Vorhabens liegen:

- hohe Anforderungen an Zertifizierung von Personal und Equipment im Offshore-Einsatz
- hohe Sensibilität hinsichtlich Risikominimierung seitens Bauherr und ausführendem Unternehmen (Notfall-Vorrichtungen am HSD-System)



- komplexe Organisationsstruktur und Notwendigkeit der Abstimmung mit vielen Beteiligten (ausführendes Unternehmen, Konstrukteur HSD-System, Bauherr, Errichterschiff, Zertifizierer, Versicherer, etc.)
- umfangreiche Modifikationen am System nach fehlgeschlagenem ersten Hafentest
- Verzögerungen innerhalb des Projektes London Array

Der Einsatz des Prototyps ist aus technischer Sicht als erfolgreich zu bezeichnen. Die Offshore-Tauglichkeit wurde ohne Zwischenfälle nachgewiesen. Für kommende serielle Einsätze ist das beim Prototyp-Test gewählte Vorgehen wegen der langen Unterbrechung im Installationsablauf und wegen des nicht schallreduzierten ersten Teils der Rammung nicht als praxistauglich einzustufen. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass Konzepte zur vollständigen Integration des Schallminderungssystems in den Bauablauf existieren und auch technisch durchgeplant wurden. Aufgrund des nötigen Aufwandes war jedoch eine Umsetzung für den einmaligen Einsatz beim OWP *London Array* wirtschaftlich nicht vertretbar.

**Tabelle 11: zeitlicher Ablauf HSD-Einsatz beim Pfahl F05**

Uhrzeit	Dauer	Aktivität
17:25	0:25	Hammer ablegen
17:50	0:30	HSD-System anschlagen
18:20	0:40	HSD-System über Pfahl schwenken, auffädeln und zu Wasser lassen
19:00	0:15	Aufnahme für HSD-System ablegen
19:15	0:45	Hammer aufnehmen
20:00		Rammung fortsetzen
20:30		Schwimmring fluten
20:50	0:25	Hammer ablegen
21:15	0:45	HSD-System aufnehmen und an Deck schwenken
22:00	0:15	Tragseile abschlagen und verstauen
22:15	0:10	Schwimmring anheben und HSD-Netz richten
22:25	0:20	Traverse abschlagen und verstauen
	<b>2:55</b>	<b>Summe direkte Dauer Einsatz HSD-System</b>
	<b>1:10</b>	<b>Summe indirekte Dauer Einsatz HSD-System</b>
	<b>4:05</b>	<b>Summe Verzögerungen Einsatz HSD-System</b>

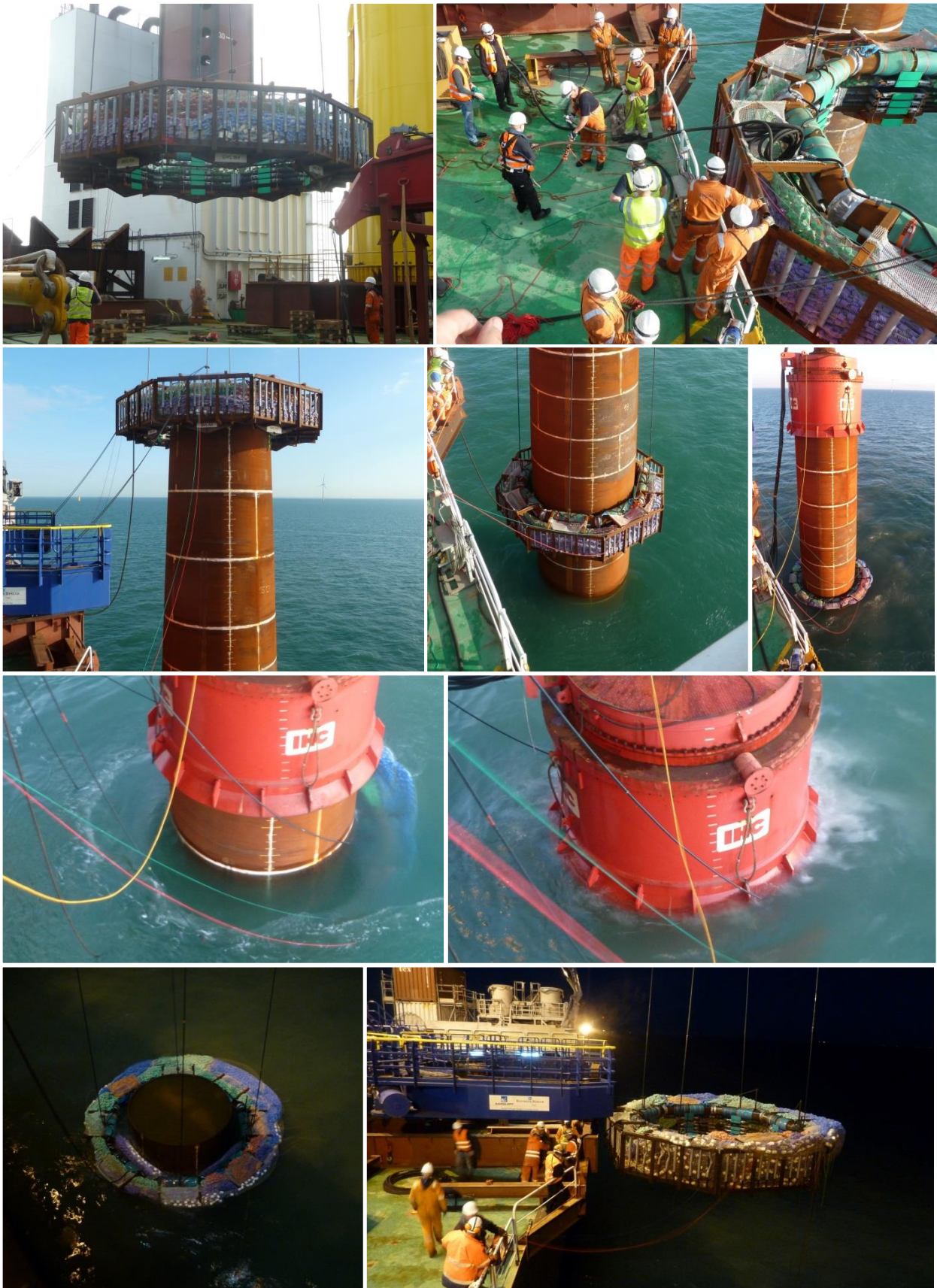


Abbildung 47: Einsatz des HSD-Systems beim Pfahl F05, chronologisch von links oben nach rechts unten

### II.3.4 Messungen beim OWP *London Array*

Zur Bestimmung der Hydroschallemissionen im Fernbereich führte die *itap* bei der Installation der Fundamente G10, F04 und F05 Messungen durch. Der vollständige Bericht hierzu ist in Anhang D enthalten. Es wurden bei den drei Fundamenten jeweils sieben Messpositionen (MP) in 250 m, 750 m und 1500 m Abstand zum Pfahl untersucht. In 750 m und 1500 m wurde mit, gegen und quer zur Strömung gemessen. An jeder Messposition wurde in zwei verschiedenen Wassertiefen, 1 m und 7 m über Grund, gemessen. An drei Messpositionen wurden zusätzlich Geophone der CAU Kiel eingesetzt. Die Messsysteme wurde von Bord der die *Reykjanes* ausgebracht.

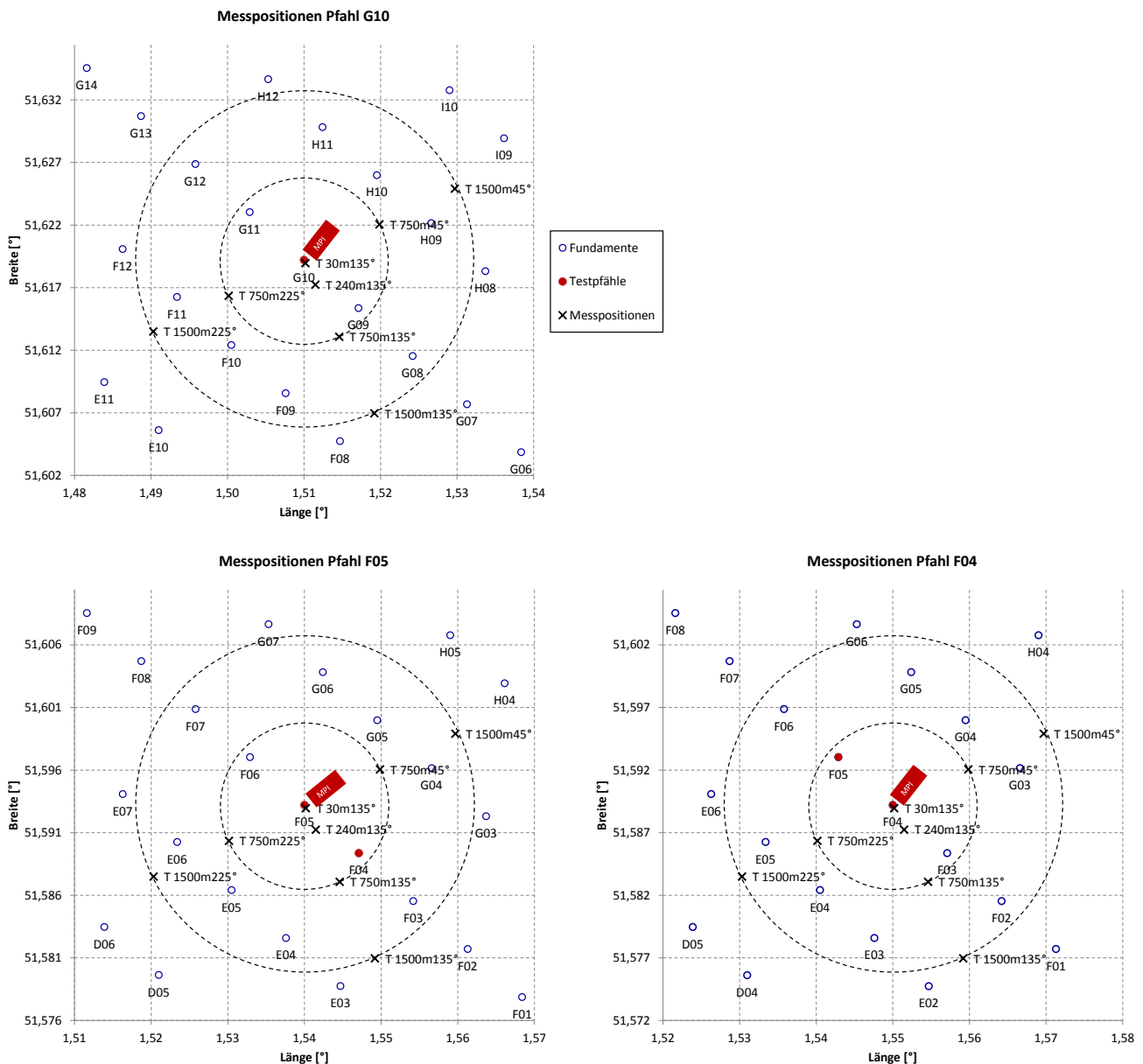


Abbildung 48: Messpositionen der *itap* beim Offshore-Test *London Array*

Die Anordnung der einzelnen Messpositionen wurde bei allen drei Pfählen möglichst ähnlich gewählt (vgl. Tabelle 12). Beim Pfahl G10 fiel das Messgerät an MP5 aus, das Gerät an MP8 konnte bei allen Messungen nur einen Kanal aufzeichnen. Nachdem dieser Fehler beim ersten Pfahl (F04) auf-



gefallen war, wurde entschieden, dass an MP8 in 1 m über Grund aufgezeichnet werden sollte, was der Intention der Messvorschrift des BSH am nächsten kam [Müller/Zerbs, 2013].

Tabelle 12: Messpositionen der *itap* beim Offshore-Test *London Array* [itap, 2013]

Messposition	Entfernung	Richtung	Bemerkungen
MP1	1.500 m	WSW	-
MP2	1.500 m	SSO	-
MP3	1.500 m	ONO	-
MP4	750 m	WSW	-
MP5	750 m	SSO	technischer Defekt bei G10
MP6	750 m	ONO	-
MP8	250 m	SSO	Defekt bei F04 (1 m ü.G.) sowie F05 und G10 (7 m ü.G.)

Während der Rammung des ersten Pfahles wurde mithilfe einer CTD-Sonde die Schallgeschwindigkeit in der Wassersäule bestimmt. Es zeigten sich keine Schichtungen im Wasser, die Schallgeschwindigkeit konnte gleichmäßig über die Wassertiefe zu etwa 1.515 m/s festgestellt werden (Abweichungen < 1 m/s). Bei einem Messsystem kam es zu technischen Problemen, sodass in 250 m Entfernung zum Pfahl nur in einer Wassertiefe gemessen werden konnte.

Die Messsysteme wurden von einem separaten Messschiff ausgebracht, welche die oben angegebenen Positionen in Absprache mit dem Errichterschiff anfuhr. Die Datenerfassungseinheit sowie ein Anker sorgten für den nötigen Ballast und eine stabile Lage der Systeme am Meeresgrund. Durch Auftriebskörper wurden die Hydrophone in zwei verschiedenen Höhen gehalten. Über eine Boje konnte das System nach Ende der Rammung wieder aufgenommen werden. In der folgenden Abbildung ist das eingesetzte System in einer Skizze (links) und auf einem Foto (rechts) dargestellt.

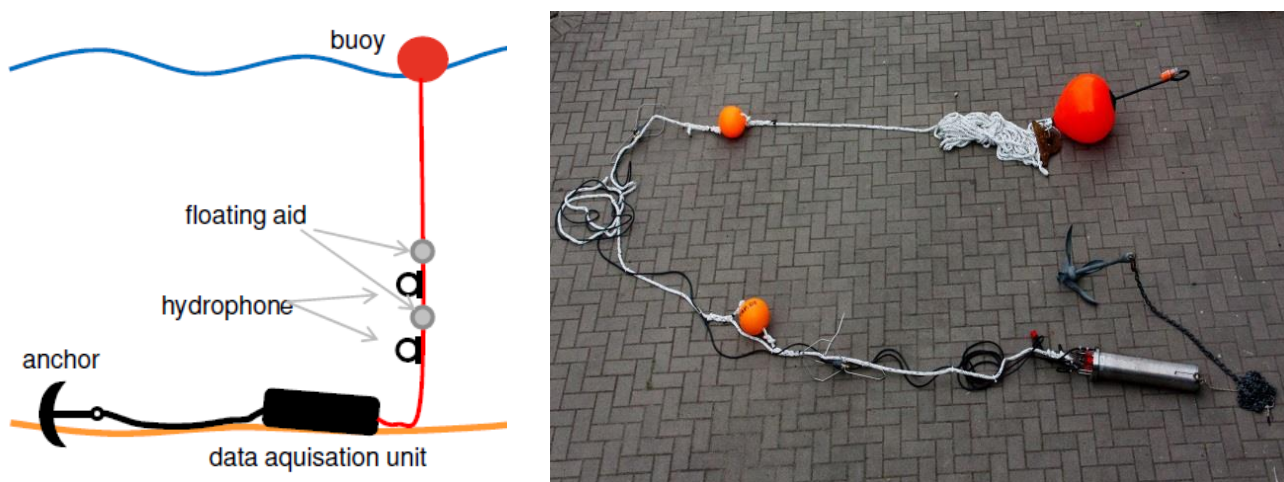


Abbildung 49: Skizze (links) und Foto (rechts) eines Messsystems der Fa. *itap* [© itap]

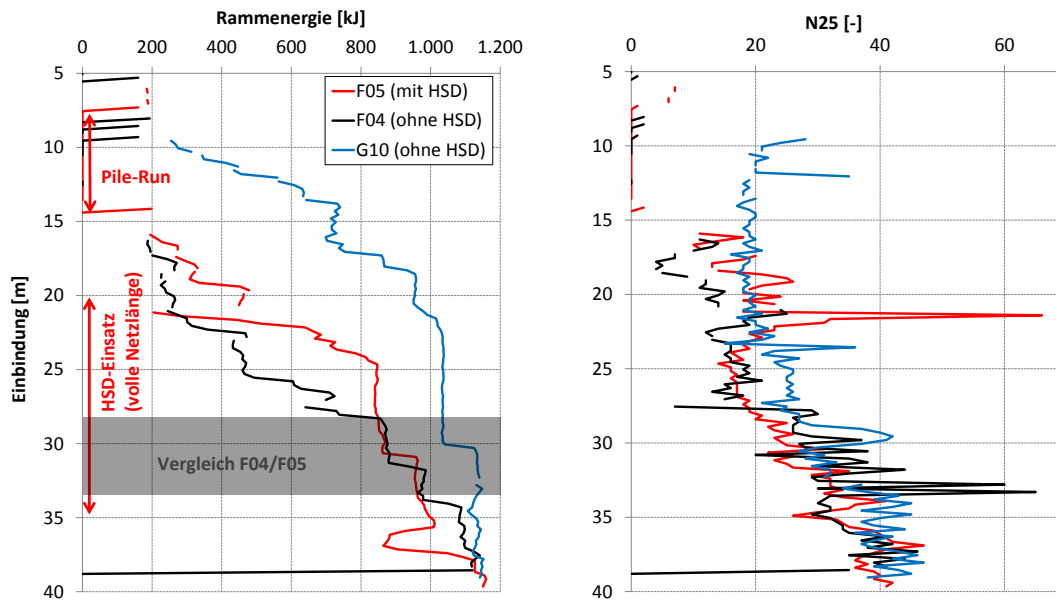
Es wurden Systeme verwendet, die von der Fa. *itap* für Hydroschallmessungen im Rahmen des Bauminitorings von OWP's eingesetzt werden und den Messvorschriften des BSH [Müller/Zerbs, 2011] entsprechen. In Tabelle 13 sind das eingesetzte Messequipment und die wichtigsten technischen Spezifikationen zusammengestellt.

**Tabelle 13: Messequipment *itap***

<b>Gerät</b>	<b>Hersteller</b>	<b>technische Daten</b>
autonomes Unterwassermesssystem	itap	Frequenzbereich: 10 Hz – 20 kHz Samplingfrequenz: 44,1 kHz Auflösung: 24 bit
Hydrophon TC 4033	Reson	Empfindlichkeit: 0,50 pC/Pa
Hydrophon TC 4013	Reson	Empfindlichkeit: 0,12 pC/Pa
Messverstärker	itap	Empfindlichkeit: 0,1 mV/pC

Zur Bestimmung der Schallminderungswirkung des HSD-Systems sind die Schallpegel bei der Rammung des Pfahles F05 (HSD-Einsatz) auf Messungen an einem Referenzpfahl ohne Schallminderung zu beziehen. Da der Einsatz des HSD-Systems am Pfahl F04 abgebrochen wurde und beim Pfahl G10 gar nicht vorgesehen war, kommen hierfür beide Pfähle infrage. Für eine bestmögliche Vergleichbarkeit sollten die Randbedingungen am Referenzpfahl denen am Testpfahl F05 möglichst ähnlich sein. Hierzu zählen Pfahlgeometrie, Wassertiefe und Baugrundverhältnisse. Aus Abbildung 43, Abbildung 44 und Tabelle 10 geht hervor, dass die Gegebenheiten am Standort F04 denen bei F05 am ähnlichsten sind.

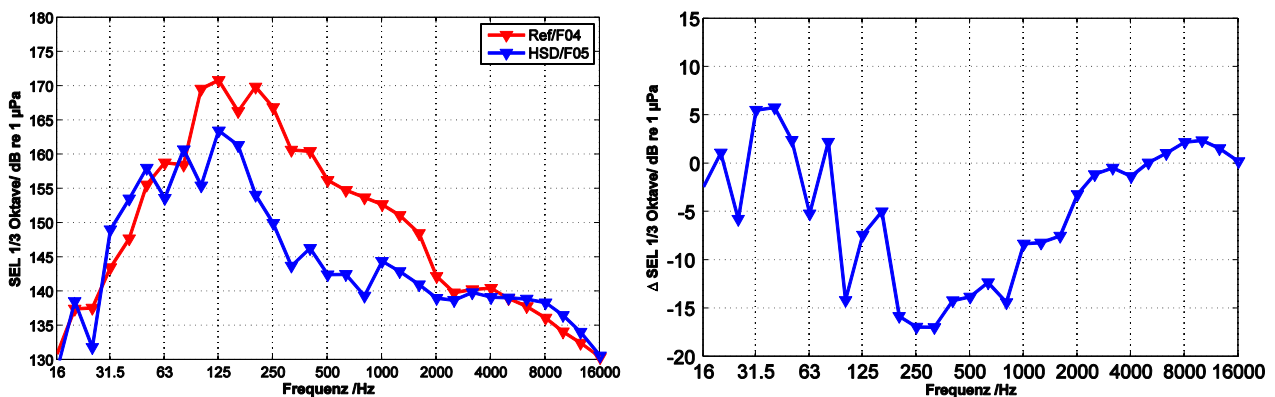
Neben den standortspezifischen Eigenschaften sind auch die Rammparameter zu berücksichtigen. Im Laufe der Rammung dringt der Pfahl in den Boden ein, bei größer werdendem Bodenwiderstand wird die Rammenergie erhöht, um weiterhin einen ausreichenden Vortrieb zu gewährleisten. Bei steigender Eindringung des Pfahles in den Boden verändert sich das Schwingverhalten des Pfahles [Stein et al., 2015], mit steigender Rammenergie gehen größere Hydroschallemissionen einher [Elmer et al., 2007]. Aus diesem Grund sind die Lärmpegel von Schlägen mit ähnlicher Einbindetiefe der Pfähle bei ähnlicher Rammenergie zu vergleichen. Abbildung 50 zeigt auf der linken Seite die Entwicklung der Rammenergie über die Pfahleindringung für alle im Rahmen des Offshore-Tests untersuchten Pfähle. Die Pfähle F05 (rot) und F04 (schwarz) wurden bei einer Einbindung von ca. 28 m bis 33 m mit annähernd gleicher Energie gerammt. Diese Bereiche sind daher für die Auswertung der Hydroschallmessungen besonders zu beachten. Auf der rechten Seite der Abbildung 50 ist die erforderliche Schlagzahl für einen Vortrieb des Pfahles um 25 cm (N25) angegeben. Die Schlagzahl kann als ein Maß für den Eindringwiderstand des Pfahles angesehen werden und ist im betrachteten Bereich beim Referenzpfahl F04 tendenziell höher als beim Pfahl F05.



**Abbildung 50: Entwicklung der Rammenergie und der Schlagzahl bei den Testpfählen des OWP London Array**

Die folgenden Vergleiche zwischen Hydroschallemissionen mit und ohne HSD beziehen sich jeweils auf die in Abbildung 50 (links) grau hinterlegten Bereiche der Rammung mit vergleichbarer Rammenergie und Eindringtiefe des Pfahles.

Beim Vergleich der Hydrophonmessungen in Höhen von 1 m und 7 m über Grund zeigt sich wie erwartet ein höherer Schallpegel an den bodennahen Sensoren. Daher beziehen sich die weiteren Auswertungen auf die Messungen an den tieferen Hydrophonen gemäß der offiziellen Messvorschrift [Müller/Zerbs, 2013]. Abbildung 51 zeigt exemplarisch die Terzspektren der Referenzpfahles F04 sowie des Pfahles F05 mit HSD Einsatz an MP5 für den vergleichbaren Teil der Rammung. Es zeigt sich eine Wirksamkeit des HSD-Systems im Frequenzbereich von etwa 100 Hz bis 2.000 Hz mit über 15 dB (SEL) Minderung in einzelnen Terzen.



**Abbildung 51: Terzspektren (links) der Pfahle F04 (Referenz, rot) und F05 (HSD, blau) und Differenzspektrum (rechts) an MP5 (750 m vom Pfahl, 1 m über Grund) [itap, 2013]**

Abbildung 52 zeigt die Differenzspektren für Entfernungen von 750 m und 1.500 m zum Pfahl. In blauer Farbe sind die Pegeldifferenzen über die Terzfrequenzen an den Messpositionen in 750 m und in blau an den Messpositionen in 1.500 m zum Pfahl abgetragen. Rot kennzeichnet den Mittelwert zwischen beiden Verläufen. Links sind die Messpositionen in westlicher und rechts in östlicher Richtung zu sehen.

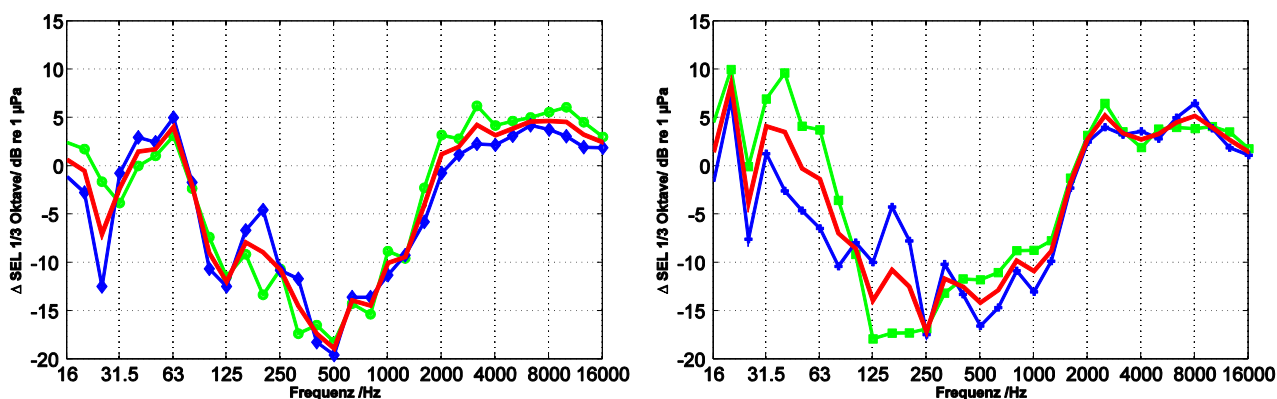


Abbildung 52: Differenzspektren der Messpositionen in 750 m (blau) und 1.500 m (grün) vom Pfahl in westlicher (links) und östlicher (rechts) Richtung [itap, 2013]

In östlicher Richtung (links) zeigt sich kein Einfluss der Entfernung auf die Minderungswirkung des HSD-System, in westlicher Richtung (rechts) hingegen ist zu erkennen, dass die Minderungswirkung bis etwa 100 Hz in 750 m deutlich besser ist während zwischen 100 Hz und 250 Hz die Minderungswirkung in 1.500 m besser ist. Grundsätzlich lässt sich jedoch feststellen, dass sich die Terz- und Differenzspektren in 750 m und 1.500 m stark ähneln. Näher am Pfahl ist die Charakteristik der Dämpfungsspektren jedoch unterschiedlich.

Für Anteile des Hydroschalls über 2 kHz ist eine Erhöhung der Pegel zu erkennen. Diese kann auf Vibrationen von Stahlbauteilen der Ballastbox des HSD-Systems infolge der Rammschläge zurückzuführen sein, da davon auszugehen ist, dass das System teilweise am Pfahl anliegt. Im niederfrequenten Bereich wird der Hydroschall zudem durch die untere Grenzfrequenz beeinflusst, welche von der Wassertiefe abhängig ist. Die ermittelte Schallminderung im Bereich unter 100 Hz ist entsprechend zu interpretieren [Urlick, 1983; Elmer et al., 2007].

Wie oben erläutert, wurden Messungen in verschiedenen Himmelsrichtungen durchgeführt, um einen etwaigen Einfluss der Strömung auf Schallminderung des HSD-Systems erkennen zu können. In Abbildung 53 sind links die Mediane der Differenzspektren aller Messpositionen in den drei untersuchten Richtungen und rechts die Differenzen der der Differenzspektren in 750 m und 1.500 m abgebildet.

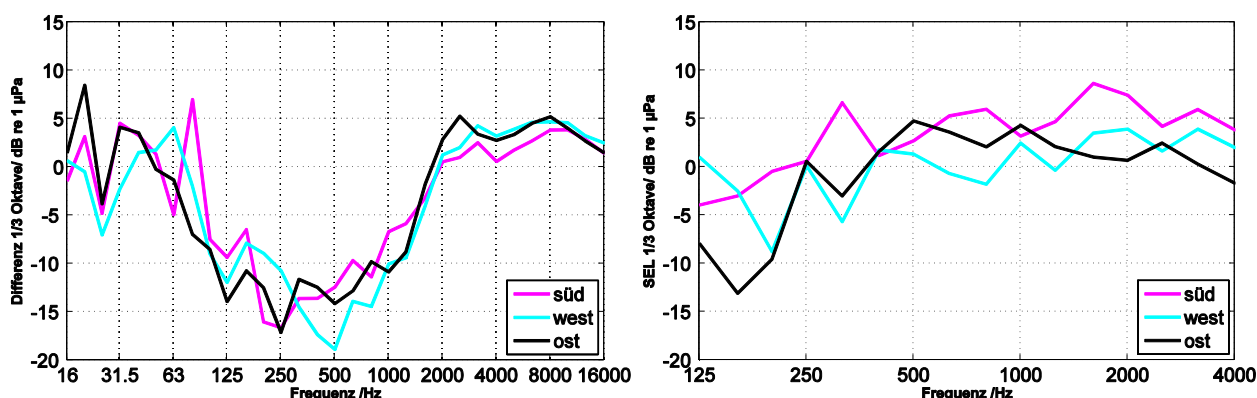


Abbildung 53: Mediane der Differenzspektren aller Messpositionen in den verschiedenen Himmelsrichtungen (links) und Differenzen der der Differenzspektren in 750 m und 1.500 m zum Pfahl in den verschiedenen Himmelsrichtungen (rechts) [itap, 2013]

Es zeigt sich zunächst, dass die Differenzspektren in allen Richtungen sehr ähnlich aussehen. Obwohl aufgrund der starken Strömung im tideabhängigen Bereich der Themsemündung davon auszugehen ist, dass sich das HSD-Netz während der Rammung einseitig an den Pfahl angelegt hat, ist kein Einfluss auf die Schallminderung in einer Richtung erkennen. Die Strömung und der damit verbundene unterschiedliche Abstand zwischen Pfahl und HSD-Elementen hat demnach keinen Einfluss auf die Minderungswirkung des HSD-Systems.

Abweichungen der Schallminderung zwischen 750 m und 1.500 m Abstand zum Pfahl treten insbesondere im unteren Frequenzbereich bis etwa 500 Hz auf. Die Ursachen hierfür sind nicht bekannt, könnten jedoch auf die unregelmäßige Bathymetrie im Untersuchungsgebiet zurückzuführen sein.

Weitere Details befinden sich im offiziellen Messbericht der *itap* in Anhang D. In der folgenden Tabelle 14 sind die Einzelereignispegel und Spitzenpegel der Pfähle F04 (Referenz) und F05 (HSD) in 750 m und 1.500 m sowie die daraus errechneten Pegeldifferenzen aufgeführt.

**Tabelle 14: Zusammenfassung der Ergebnisse bei den Vergleichspfählen F04 und F05 in 750 m und 1.500 m Entfernung zum Pfahl [vgl. *itap*, 2013]**

Messposition	Pfahl F04 (Referenz)				Pfahl F05 (HSD)				Minderung		
	SEL <sub>05</sub> [dB]	SEL <sub>50</sub> [dB]	SEL <sub>90</sub> [dB]	L <sub>peak</sub> [dB]	SEL <sub>05</sub> [dB]	SEL <sub>50</sub> [dB]	SEL <sub>90</sub> [dB]	L <sub>peak</sub> [dB]	ΔSEL [dB]	ΔL <sub>peak</sub> [dB]	
750 m	MP4	175,4	174,9	174,6	199,4	167,3	167	166,6	190,5	7,9	8,9
	MP5	177,1	176,6	175,8	199,7	169,2	168,4	167,1	192,5	8,2	7,2
	MP6	176,2	176	175,5	199,2	168,1	167,5	166,5	191,3	8,5	7,9
	Mittel	176,2	175,8	175,3	199,4	168,2	167,6	166,7	191,4	8,2	8,0
1.500 m	MP1	171,3	170,9	170,4	193,8	163,4	162,5	162,1	184,8	8,4	9,0
	MP2	170,1	169,4	167,9	191,1	161,7	161,5	161,1	182,7	7,9	8,4
	MP3	172,6	172,3	171,5	194	160	159,8	159,4	179,4	12,5	14,6
	Mittel	171,3	170,9	169,9	193,0	161,7	161,3	160,9	182,3	9,6	10,7

Bezogen auf den in der Regel maßgeblichen Einzelereignispegel ergibt sich in 750 m bis 1.500 m Entfernung im Mittel eine Schallminderung von etwa 9 dB (SEL). Diese resultiert aus einer breitbandigen Dämpfung von bis zu 20 dB im Bereich von etwa 80 Hz bis 2.000 Hz. Eine Richtungsabhängigkeit ist nicht festzustellen.

Zusätzlich zu den Messungen der *itap* im Fernbereich wurden vom IGB-TUBS Messungen im Nahbereich direkt von Bord des Errichterschiffes durchgeführt. Dazu wurde die in Abschnitt II.1.1 beschriebene Messtechnik inklusive Laptops zur Datenerfassung an Deck des Schiffes aufgebaut. Die Hydrophone wurden an verschiedenen Messpositionen (MP) in Entfernungen zwischen ca. 10 m und 50 m zu Wasser gelassen.

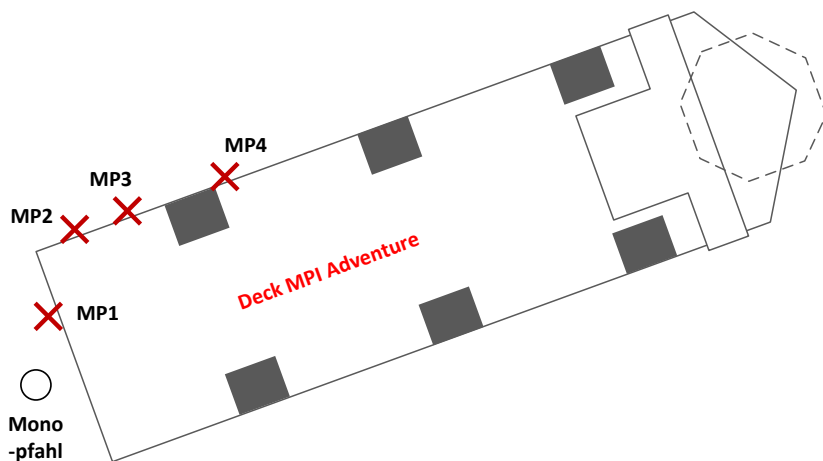


Abbildung 54: Messpositionen im Nahbereich (links) und Messequipment an Deck der MPI Adventure (rechts)

Die Messungen des IGB-TUBS wurden in ähnlicher Weise ausgewertet wie die *itap*-Messungen. Abbildung 55 zeigt den Verlauf des SEL an vier Messpositionen im Nahbereich (farbige Linien) sowie den Verlauf der Rammenergie (graue Linie) über die Rammung beim Pfahl F05. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme des SEL infolge des Einsatzes des HSD-Systems (ungefähr bei Schlag 500) von ca. 17 dB. Bis ca. Schlag 2.000 bleibt der Pegel stabil. Nach Absenken des Schwimmringes steigt der SEL wieder deutlich an, bleibt jedoch trotz erhöhter Rammenergie unter den Werten vor Einsatz des HSD-Systems. Es ist daher davon auszugehen, dass auch ein unvollständig ausgefahrenes HSD-Netz eine Dämpfungswirkung hat, sich jedoch über den Bereich der Wassersäule ohne HSD-Netz eine Schallbrücke ausbildet, welche die Wirksamkeit des Systems stark verringert.

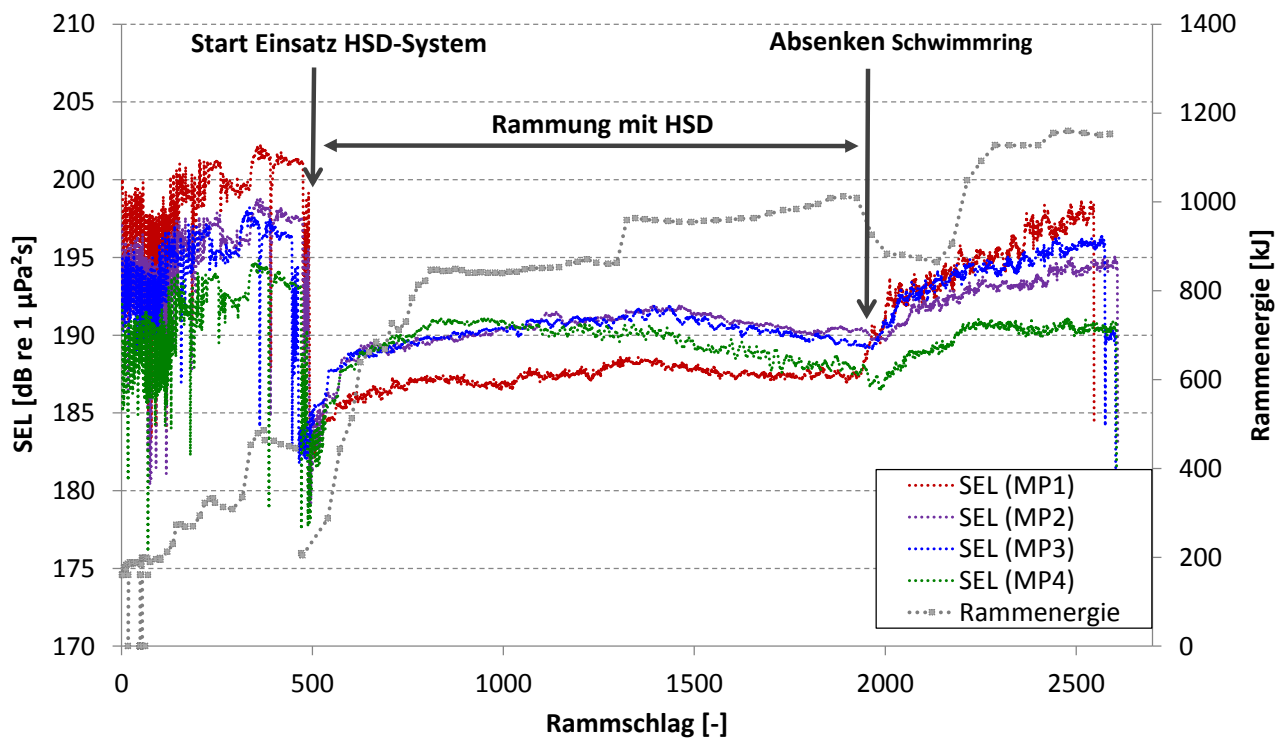


Abbildung 55: Entwicklung des SEL im Nahbereich (linke Ordinate) und der Rammenergie (rechte Ordinate) über die Rammdauer beim Pfahl F05 mit HSD-Einsatz (von Schlag 500 bis Schlag 2.000)

Ein Einfluss der Rammenergie ist bestenfalls tendenziell zu erkennen. Zu Beginn der Rammung streuen die Pegel stark. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Rammenergie gerade bei relativ zur maximalen Rammenergie des Hammers geringen Energie nicht genau eingestellt werden kann [Gattermann et al, 2012]. Zudem verändert sich das Schwingverhalten des Pfahles mit zunehmender Eindringung in den Boden, was insbesondere zu Beginn der Rammung Auswirkungen auf den emittierten Hydroschallpegel haben kann [Stein et al., 2015].

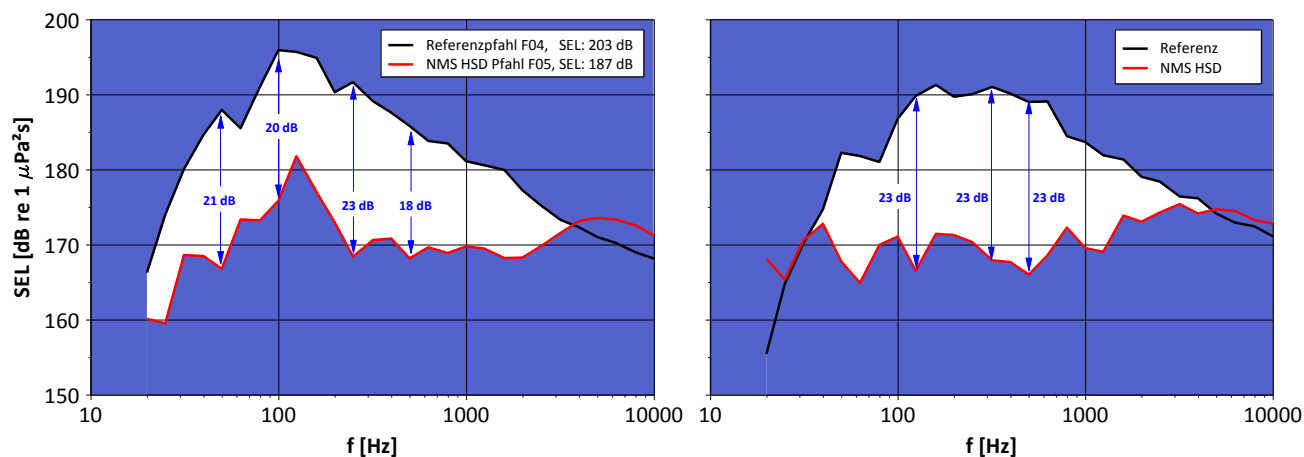
Im Vergleich zur Referenzmessung an Pfahl F04 ergibt sich im Nahbereich des Pfahls F05 eine deutlich größere Minderung der Pegelgrößen von ca. 16 dB (SEL und  $L_{peak}$ ), wie Tabelle 15 zeigt. Zur Ermittlung der Pegeldifferenzen wurden die hinsichtlich Rammenergie und Pfahleindringung vergleichbaren Rammphasen zugrunde gelegt (vgl. Abbildung 50).

**Tabelle 15: gemessene Pegel des Hydroschalls im Nahbereich der Vergleichspfähle F04 und F05**

Messposition		F04 (Referenz)		F05 (HSD)		Minderung	
		SEL [dB]	$L_{peak}$ [dB]	SEL [dB]	$L_{peak}$ [dB]	$\Delta$ SEL [dB]	$\Delta L_{peak}$ [dB]
15 m	MP1	203,0	221,4	187,5	204,9	15,5	16,5

Die deutlich größeren Pegelunterschiede im Nahbereich sind wie beim *ESRa*-Test auf einen Bodeneinfluss zurückzuführen. Der Pile-Run beim Pfahl F05 deutet auf eine extrem weiche Schicht hin, die von steiferen Schichten über- und unterlagert ist. Dieses Zusammenspiel kann zu einer verstärkten Übertragung von Bodenschall führen.

Auch im Nahbereich wurden neben den Absolutpegeln die Rammschallemissionen bzw. deren Minderung im Frequenzbereich untersucht. Abbildung 56 zeigt links die Terzspektren der Nahbereichsmessungen bei den Pfählen F04 (Referenz, schwarze Linie) und F05 (mit HSD, rote Linie) sowie analog dazu das Ergebnis des *ESRa*-Testes auf der rechten Seite. Es zeigt sich eine breitbandige Wirkung des HSD-Netzes von 20 Hz (untere Grenze des Messbereichs) bis etwa 3.000 Hz. Im Vergleich zum *ESRa*-Test ist eine zusätzliche Schallminderung im nieder- (< 100 Hz) und höherfrequenten Bereich (> 1.000 Hz) festzustellen, welche auf die zusätzlichen, größeren und kleineren HSD-Elemente im Netz zurückgeführt werden kann (vgl. Abbildung 39).



**Abbildung 56: Dämpfungswirkung des HSD-Systems beim Offshore-Test London Array (links) und beim *ESRa*-Test (rechts) [Wilke et al., 2012] im Frequenzbereich im Nahfeld (ca. 22 m bzw. 6 m Entfernung zum Pfahl)**



Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit der Messungen des IGB-TUBS und der *itap* wurde eine zusätzliche Messboje der *itap* von Deck des Errichterschiffes bei MP2 zu Wasser gelassen. In Abbildung 57 sind die mit den Messsystemen des IGB-TUBS und der *itap* aufgezeichneten Einzelereignispegel beim Pfahl F05 gegenübergestellt. Es ergeben sich Abweichungen zwischen den Messungen von 1 - 2 dB, die auf nicht identische Positionen im Wasser zurückzuführen sind (zwei separate Messketten).

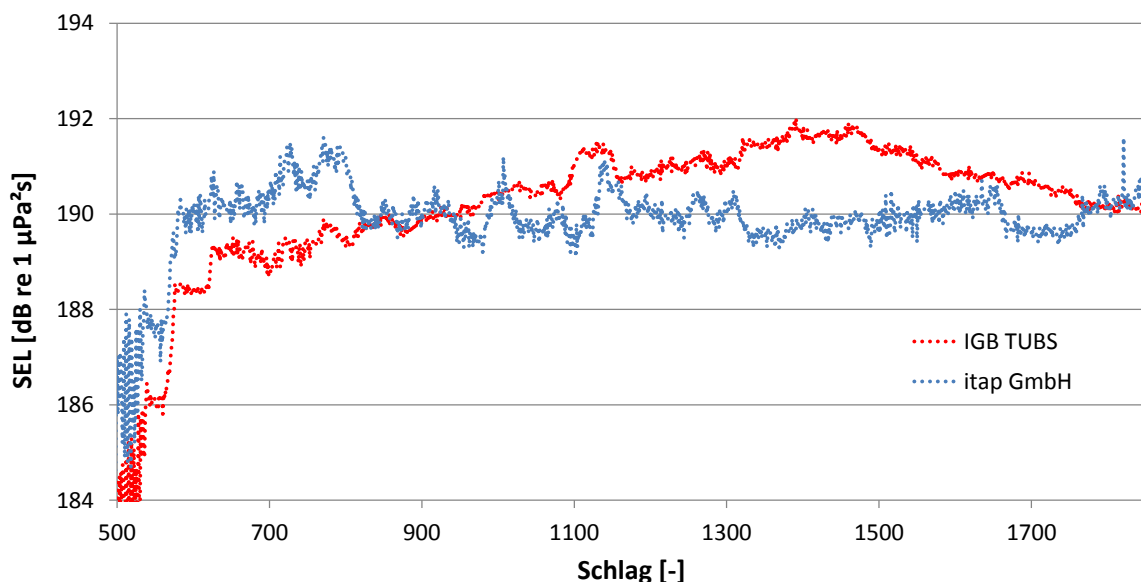


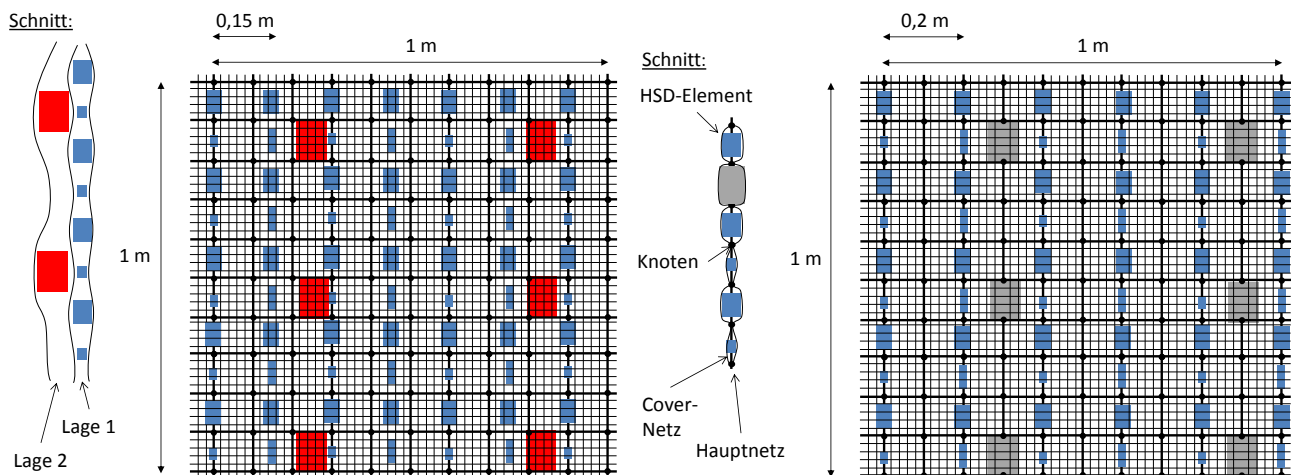
Abbildung 57: Gegenüberstellung der ermittelten SEL-Verläufe über die Rammung des Pfahles F05 mit Messsystemen der *itap* (blau) [itap, 2013] und des IGB-TUBS (rot)

### II.3.5 Vorbereitung eines weiteren Offshore-Tests

Ein zweiter Offshore-Einsatz war bei der Installation der Fundamente des *OWP DanTysk* geplant. Der Windpark liegt 70 km vor Sylt an der Grenze zur dänischen AWZ. Er besteht aus 80 WEA der 3,6 MW-Klasse, welche in 21 m bis 32 m Wassertiefe auf Monopfählen mit 6 m Durchmesser gegründet sind. Die Gründungsarbeiten dauerten von Februar bis Dezember 2013. Bauherr ist die *DanTysk Offshore Wind GmbH*, ein Joint Venture aus *Vattenfall* und den *Stadtwerken München*.

Anfang 2013 wurden Gespräche zwischen dem IGB-TUBS und dem bauausführenden Unternehmen ABJV aufgenommen, welches schon beim ersten Offshore-Test beim *OWP London Array* den Einsatz des HSD-Systems unterstützt hatte. Da beim *OWP DanTysk* der Einsatz von Schallminderungssystemen auch aus Gründen der Genehmigung geboten war, wurde der serielle Einsatz von HSD bei gut der Hälfte der Anlagen geplant. Dazu sollte u.a. der auch bei diesem Projekt eingesetzte Pile-Gripper soweit umgebaut werden, dass ein HSD-System an den Gripper gehängt und vom ersten Schlag an ohne Unterbrechung der Rammung hätte eingesetzt werden können.

Teile des HSD-Prototyps, insbesondere die Ballast-Box, sollten auch bei *DanTysk* eingesetzt werden. Das Layout des HSD-Netzes sollte gegenüber dem Netz von *London Array* modifiziert werden (s. Abbildung 58). Die Dichte an HSD-Elementen wurde insgesamt erhöht, um einen bessere Dämpfungswirkung zu erzielen. Außerdem wurde das Netz modular aus mehreren Lagen aufgebaut, um verschiedene Bestückungen mit unterschiedlichen Elementen in verschiedenen Tiefen besser realisieren zu können.



**Abbildung 58: geplantes Netzlayout DanTysk (links) im Vergleich zu London Array (rechts)**

Letztendlich entschied sich der Bauherr jedoch gegen den Einsatz des HSD-Systems zugunsten einer Lösung mit mehreren Blasenschleibern. Somit konnte ein zweiter Offshore-Test im OWP *DanTysk* nicht realisiert werden.

Aufgrund des knappen Zeitplanes im Falle einer positiven Entscheidung zum Einsatz von HSD beim OWP *DanTysk* war ein Teil des vorgesehenen Netzes schon gefertigt worden. Das Netz wurde eingelagert und sollte im Falle eines Offshore-Tests bei einem anderen Windpark eingesetzt werden. Es wurden Gespräche mit den beim OWP *Amrumbank West* für den Schallschutz verantwortlichen Firmen *OffNoise-Solutions GmbH* und *Menck GmbH* über einen dortigen Einsatz geführt. Bei *Amrumbank West* wurde HSD zum ersten Mal kommerziell eingesetzt (s. unten). Ein Einsatz des Forschungsnetzes im neuen HSD-System der Fa. *Menck* wurde diskutiert, konnte jedoch aus haftungstechnischen Gründen nicht realisiert werden.

### II.3.6 Begleitmessungen zum HSD-Einsatz beim OWP Amrumbank West

Ende des Jahres 2013 konnte die Fa. *OffNoise-Solutions GmbH* in Zusammenarbeit mit der Fa. *Menck GmbH* den Einsatz von HSD beim von der Fa. *E.ON Kraftwerke GmbH* erbauten OWP *Amrumbank West* realisieren.

#### Projekt Amrumbank West

Die Installation der Fundamente im OWP *Amrumbank West* wurde im Januar 2014 begonnen, nach einer längeren Unterbrechung von Mai bis August im September wieder aufgenommen und im März 2015 beendet. Der Windpark ist etwa 37 km westlich von Amrum und ungefähr 35 km nördlich von Helgoland in der deutschen Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) gelegen. Insgesamt sollen nach Fertigstellung 80 WEA der 3,6 MW-Klasse ans Netz gehen.

Bei Wassertiefen von etwa 20 m wurden Monopfähle mit einem Durchmesser von 6 m und etwa 55 m Länge zur Gründung im sandigen Baugrund verwendet. Im Gegensatz zum OWP *London Array* sind die Wassertiefen und Baugrundverhältnisse als sehr gleichmäßig zu bewerten, was insbesondere den Vergleich von Hydroschallmessungen bei verschiedenen Pfahlrammungen erleichtert.

Als Errichterschiff kam die *MPI Discovery* zum Einsatz, die Pfähle wurden mit einem Hydraulikhammer vom Typ MHU 1900S der Fa. *Menck GmbH* gerammt. Die Installation der Gründungen wurde von der Fa. *MPI* übernommen.

In der deutschen AWZ spielt der Schallschutz bei Rammarbeiten eine wichtige Rolle. Bei dem gegebenen Pfahldurchmesser war ohne den Einsatz von Schallminderungssystemen mit Hydroschallemissionen von ca. 178 dB (SEL) zu rechnen, was sich in Referenzmessungen auch bestätigte. Die dadurch nötige Schallminderung von mindestens 18 dB (SEL) ist von einem einzelnen System derzeit nicht verlässlich erzielbar. Es wurde schließlich ein Schallminderungskonzept aus HSD direkt am Pfahl und verschiedenen Konfigurationen Großer Blasenschleier in einiger Entfernung zu Pfahl entwickelt. Das HSD-System kam beim OWP *Amrumbank West* ab März 2014 zum Einsatz. Da auch bei diesem OWP das HSD-System vom Kran über den Pfahl gehoben werden musste, konnte es erst nach Erreichen einer ausreichenden Pfahleinbindung zum Einsatz kommen.

Im Gegensatz zum Prototyp wurde das System jedoch nicht über eine eigene Traverse eingesetzt. Stattdessen wurde es über eine acht-armige Traverse aufgenommen, an der in der Mitte auch der Hammer angeschlagen war. Die Ballast-Box wurde dann von acht Seilwinden abgelassen. Da kein Absenken des Netzes vor Ende der Rammung notwendig war, konnte der Schwimmring entfallen. Abbildung 59 zeigt links, wie das System über den Pfahl gehoben und zu Wasser gelassen wurde. Der Hammer schwebt noch über dem Pfahl. Rechts ist das System im Einsatz zu sehen.



**Abbildung 59: Einsatz des HSD-Systems beim OWP Amrumbank West [Bruns et al., 2014]**

In der ersten Phase der Rammung ohne HSD wurden die Hydroschallemissionen durch Verringerung der Rammenergie gering gehalten. Beim ersten Einsatz des Systems, bei dem es in Kombination mit einem doppelten Blasenschleier der Fa. *Weyres-Offshore* eingesetzt wurde, konnten Mitarbeiter des IGB-TUBS von Bord des Errichterschiffes ähnliche Messungen wie beim Offshorettest von *London Array* durchführen. Zudem wurden im Rahmen der Begleitmessungen die Hydroschallemissionen in zwei Richtungen in einer Entfernung von 750 m zum Pfahl sowie mit den verschiedenen Schallminderungssystemen untersucht. Es konnte auch auf die Messdaten eines zu einem früheren Zeitpunkt ohne Schallschutz gerammten Pfahles des Windparks zurückgegriffen werden. Die dazu verfassten Berichte konnten im Rahmen des Vorhabens ausgewertet werden. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der untersuchten Pfähle gegeben.

Tabelle 16: Pfahlspezifikationen der im Rahmen des Vorhabens betrachteten Messungen beim OWP *Amrumbank West*

Pfahl	Länge [m]	Wassertiefe [m]	Einbindetiefe [m]	Datum	Schallschutz
A70	55,35	22	28,8	15.01.2014	Referenzmessung
A58	53,20	21	28,0	25.03.2014	DBBC + HSD
A57	52,70	21	27,5	29.03.2015	DBBC + HSD
A45	53,00	21	27,5	01.04.2014	HSD

Weitere Messungen zur Untersuchungen der Wellenausbreitung in Pfahl, Boden und Wasser wurden beim OWP *Amrumbank West* im Rahmen des Forschungsvorhabens *triad* (FKZ 0325681) durchgeführt, bei dem auch die Minderungswirkung von HSD und Großem Blasenschleier näher untersucht wurde.

Zur Bestimmung der alleinigen Minderungswirkung des beim OWP *Amrumbank West* eingesetzten HSD-Systems stehen die Ergebnisse der Messungen bei den Pfählen A45 und A70 zur Verfügung. Die zweite Phase der Rammung des Pfahles A45 stellt dabei die Grundlage für die Bewertung der Schallemissionen mit HSD-System dar, die erste Phase der Rammung des Pfahles A45 oder der Pfahl A70 kommen als Referenzmessung infrage. Die Betrachtung von jeweils nur Teilen der Rammung bei unterschiedlichen Pfählen führt jedoch aufgrund der variierenden Rammenergie zu Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit. Beim Pfahl A45 wurde in der ersten Phase (ohne Schallschutz) mit einer maximalen Rammenergie von etwa 700 kJ gearbeitet, in der zweiten Phase wurde mit 1.300 kJ nahezu die doppelte Energie eingesetzt. Beim Pfahl A70 hingegen wurde sogar mit 1.700 kJ gerammt [itap, 2014].

### Ergebnisse

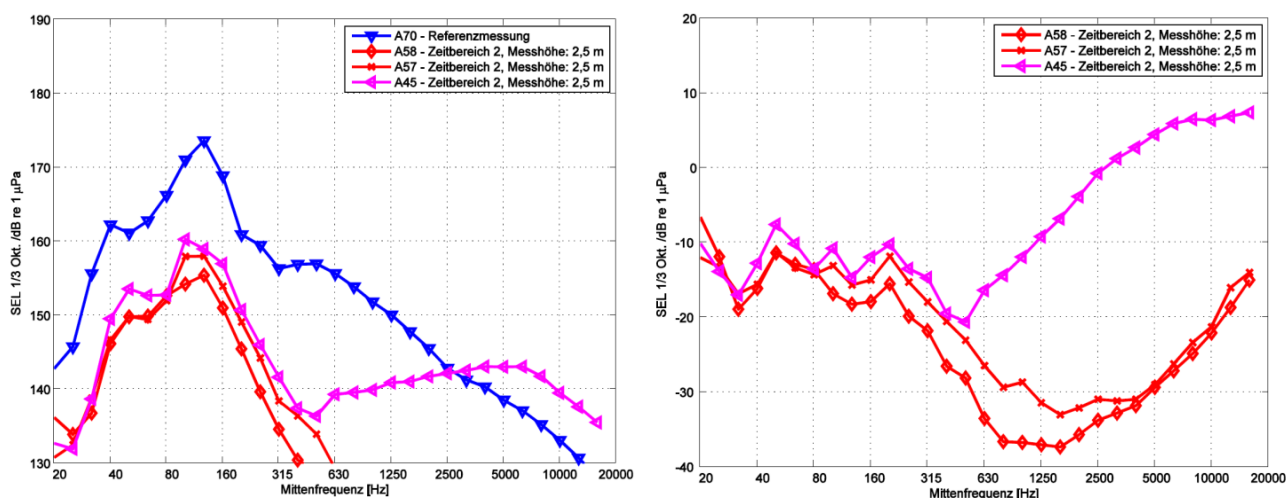
In Tabelle 17 sind die Schallpegel der beiden Referenzmessungen an Pfahl A70 sowie während des ersten Teils der Rammung des Pfahles A45 sowie vom HSD-Einsatz beim zweiten Teil der Rammung von Pfahl A45 zusammengefasst.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Schallmessungen in 750 m Entfernung zum Pfahl beim Einsatz des HSD-Systems beim OWP *Amrumbank West* [vgl. itap, 2014]

Pfahl		Rammenergie [kJ]	SEL <sub>90</sub> [dB]	SEL <sub>50</sub> [dB]	SEL <sub>05</sub> [dB]	L <sub>peak</sub> [dB]
A45 (Phase 1)	Referenz	700	170	173	175	198
A70 (gesamt)	Referenz	1.700	174	177	178	200
Mittel	Referenz	1.200	172	175	177	199
A45 (Phase 2)	HSD	1.300	164	166	167	189
Minderung	HSD	-	8	9	10	10

Es zeigt sich, dass beim ersten Einsatz Schallminderungen von 10 dB (SEL und  $L_{peak}$ ) erreicht werden konnten.

Zur Betrachtung der frequenzabhängigen Dämpfung sind in Abbildung 60 links die Terzspektren der in Tabelle 16 aufgeführten Pfähle und rechts die zugehörigen Differenzspektren abgebildet. Blau dargestellt ist die Referenzmessung am Pfahl A70, rot kennzeichnet die beiden mit HSD und BBC installierten Pfähle A58 sowie A57 und in pink ist der Pfahl A45 dargestellt, bei dem nur das HSD-System zum Einsatz kam. Bei den Pfählen A58 und A57 wird trotz der scheinbar ähnlichen Randbedingungen (Pfahlgeometrie, Rammgerät, Baugrund, Schallminderungssystem) Abweichungen von 3 dB bis 8 dB im maßgeblichen Frequenzbereich zwischen 80 Hz und 2.500 Hz deutlich. Diese können auf Unterschiede in der eingesetzten Rammenergie oder auch der Position des Blasenschleiers oder der eingesetzten Luftmenge zurückzuführen sein.



**Abbildung 60: Terzspektren (links) und Differenzspektren (rechts) der Messungen beim OWP Amrumbank West in 750 m Entfernung zum Pfahl [itap, 2014]**

Sowohl im Terzspektrum, als auch im Differenzspektrum erscheinen die Hydroschallemissionen beim Pfahl A45 denen der Pfähle A58 und A57 im Frequenzbereich bis etwa 500 Hz sehr ähnlich. Dies lässt darauf schließen, dass die Schallminderungswirkung von etwa 15 dB in diesem Frequenzbereich vorwiegend auf das HSD-System zurückzuführen ist, der DBBC bringt etwa 3 dB zusätzlich. Im höheren Frequenzbereich nimmt die Minderungswirkung stark ab, bis sie oberhalb von 2.500 Hz nicht mehr messbar ist. Fraglich ist, warum durch den Einsatz des HSD-System die Terzen oberhalb von 2.500 Hz verstärkt werden. Dies könnte auf Geräusche zurückzuführen sein, die von der Ballast-Box ausgehen, z.B. Schläge der Box gegen den Pfahl. Unter Berücksichtigung der o.g. Abweichungen zwischen den Terzspektren der Pfähle A58 und A57 kann dies aber auch auf unterschiedlich Randbedingungen bei der Rammung der beiden Pfähle A70 und A45 zurückzuführen sein.

Bei den Messungen von Bord des Errichterschiffes durch das IGB-TUBS konnten im Vergleich zu *London Array* deutlich mehr Messpositionen mit Abständen zwischen 25 m und 150 m zum Pfahl eingerichtet werden. Die Sensoren und Ballastierungen wurden mithilfe handbetriebener Krane zu Wasser gelassen (s. Abbildung 61).



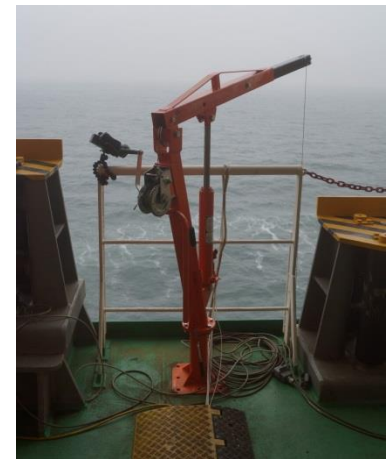
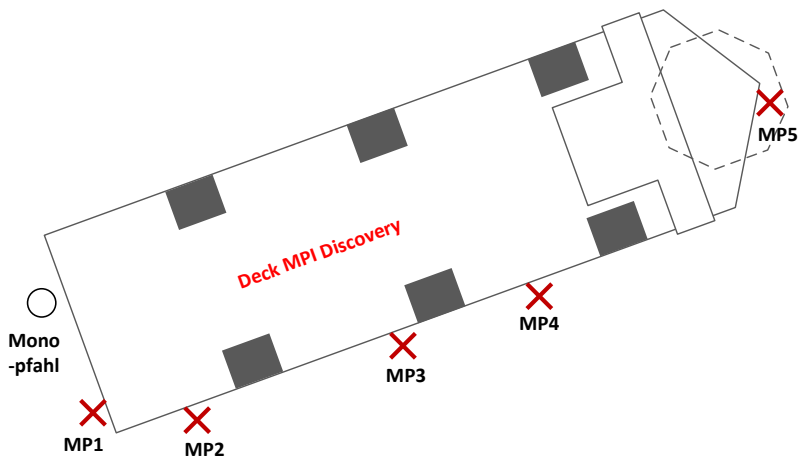


Abbildung 61: Messpositionen im Nahbereich (links) und Handkran zum Herablassen des Messequipments von Bord der MPI Discovery (rechts)

In der Entwicklung des SEL über die Rammung an Pfahl A58 ist in Abbildung 62 wie schon beim Prototypen-Test ein starker Rückgang der Schallemissionen durch den Einsatz des HSD-Systems (etwa bei Schlag 740) festzustellen.

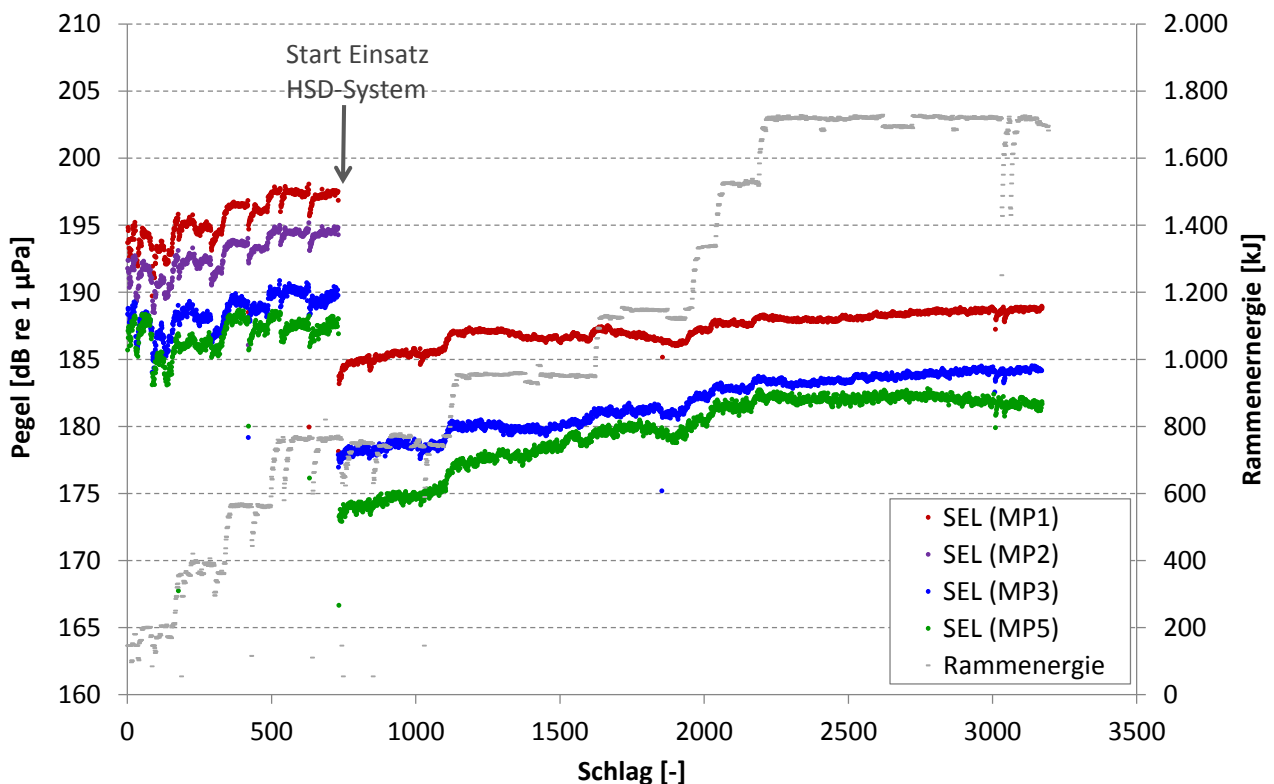


Abbildung 62: Entwicklung des SEL im Nahbereich (linke Ordinate, Ausfall der Messgeräte an MP2 im zweiten Teil der Rammung) und der Rammenergie (rechte Ordinate) über die Rammdauer beim Pfahl A58 mit HSD-Einsatz (ab etwa Schlag 740)

Aufgrund der gleichbleibenden Rammenergie über eine gewisse Schlagzahl vor und nach der Rammunterbrechung zum Einsatz des HSD-Systems lässt sich die Schallminderungswirkung des Systems im Nahbereich gut ermitteln. Die Messungen wurden an einem Pfahl mit denselben Randbe-



dingungen durchgeführt, der Einsatz des Blasenschleiers hat hier keine signifikante Auswirkung auf die Pegel. Die Ergebnisse einer Medianbildung des SEL über die Bereiche gleicher Rammenergie mit und ohne HSD an Messposition 1 bei den Pfählen A58 und A45 sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: gemessene Pegel des Hydroschalls im Nahbereich an MP1 in 25 m Entfernung bei Pfählen A58 und A45

Pfahl	ohne HSD		mit HSD		Minderung	
	SEL [dB]	L <sub>peak</sub> [dB]	SEL [dB]	L <sub>peak</sub> [dB]	ΔSEL [dB]	ΔL <sub>peak</sub> [dB]
A58	197,3	218,0	185,3	205,3	12,0	12,7
A45	197,2	217,9	185,5	207,9	11,6	10,0

Der Einzelereignispegel wird bei beiden Pfählen im Nahbereich um etwa 12 dB gemindert, der Spitzenpegel um ca. 10 dB bis 13 dB. Eine ähnliche Minderung wäre auch beim Pfahl A57 zu erwarten gewesen, jedoch kam es hier zu einem Bedienfehler am HSD-System. In Abbildung 63 ist zu erkennen, dass kurz nach Beginn der zweiten Rammphase mit HSD (etwa bei Schlag 850) der SEL auf den ersten Schlägen um ca. 10 dB im Vergleich zum Ende der ersten Rammphase ohne HSD zurückgeht. Kurz darauf steigt dieser aber bei gleichbleibender Rammenergie (bis etwa Schlag 1.250) wieder an. Im weiteren Verlauf gibt es einen weiteren Anstieg der Rammenergie (etwa zwischen Schlag 2.100 und Schlag 2.250).

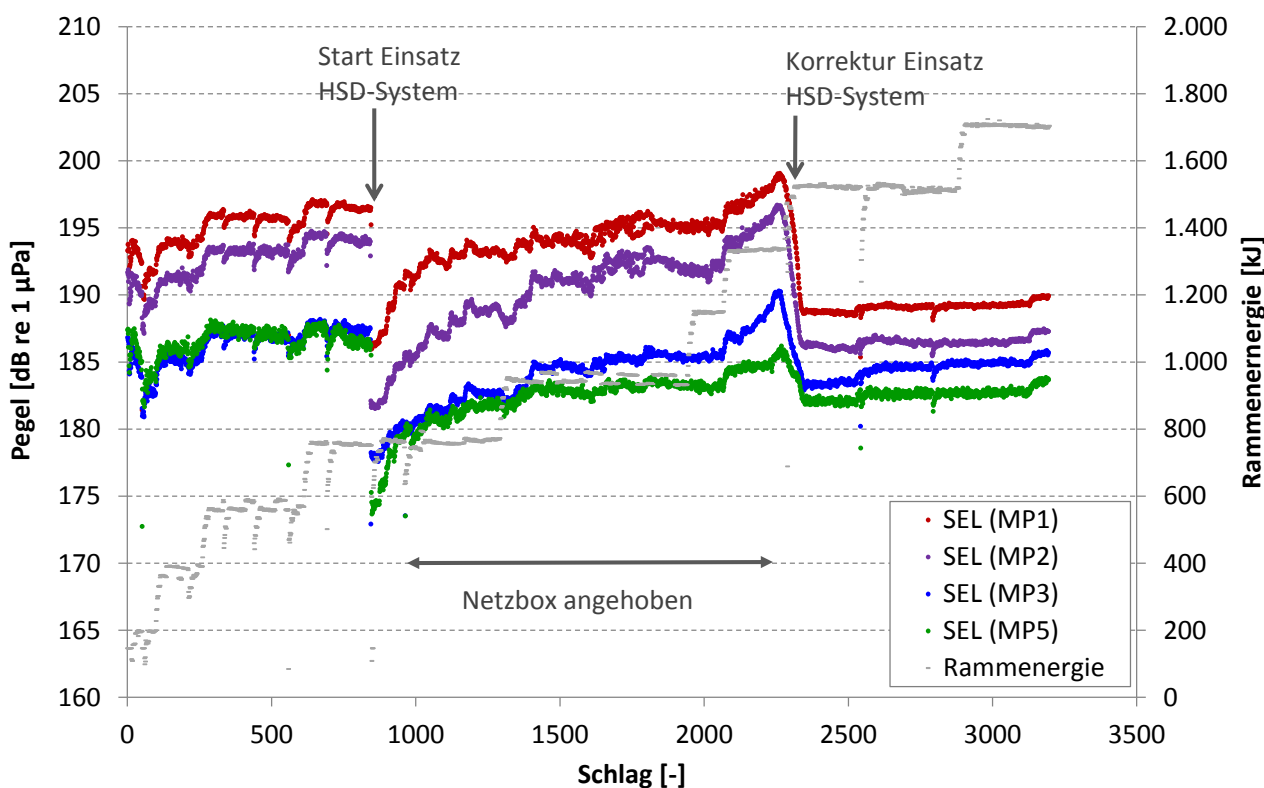
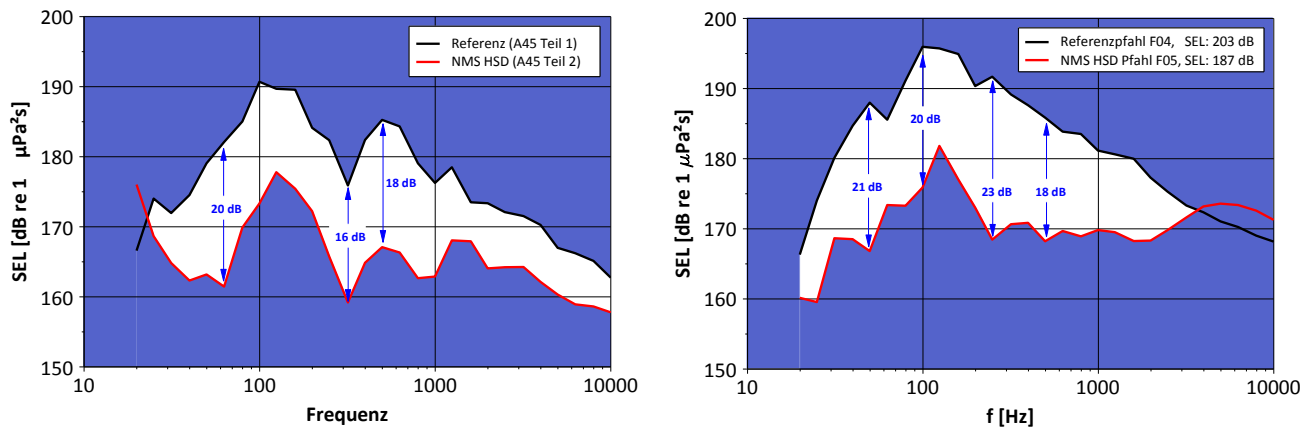


Abbildung 63: Entwicklung des SEL im Nahbereich (linke Ordinate) und der Rammenergie (rechte Ordinate) über die Rammdauer beim Pfahl A57 mit Bedienfehler des HSD-Systems (zwischen etwa Schlag 900 und Schlag 2.300)

Zu diesem Zeitpunkt fiel an Deck des Errichterschiffes auf, dass das HSD-System mit den Winden während der Rammung sukzessive hochgezogen worden war. Dies bedeutet, dass der Pfahl im unteren Bereich nahe dem Meeresboden nicht vom HSD-Netz umgeben war, was eine Verringerung der Dämpfungswirkung ähnlich wie beim Absenken des Schwimmringes des HSD-Prototypen beim Offshore-Test beim OWP *London Array* (vgl. Abbildung 55) zur Folge hatte. Nachdem dieser Fehler bemerkt worden war, wurde er behoben, indem die Ballast-Box wieder auf den Boden abgelassen wurde und damit das HSD-Netz den Pfahl wieder über die gesamte Höhe der Wassersäule umschloss. Daraus resultierte ein deutlicher Rückgang und im Weiteren ein stabiler Verlauf der Schallpegel (etwa ab Schlag 2.300).

Zur Überprüfung der frequenzabhängigen Dämpfung wurden wiederum Terzanalysen durchgeführt. Abbildung 64 zeigt links die Terzspektren beim Pfahl A45 für Teile der Rammung ohne HSD (schwarz) und mit HSD (rot) bei gleicher Rammenergie sowie rechts zum Vergleich die Schallminderung beim Offshore-Test bei *London Array* anhand des Referenzpfahles F04 (schwarz) und des mit HSD gerammten Pfahles F05 (rot). Es zeigt sich eine weitere deutliche Erhöhung der Schallminderung explizit im hochfrequenten Bereich über 2.000 Hz.



**Abbildung 64: Dämpfungswirkung des HSD-Systems beim OWP *Amrumbank West* (links) und beim Offshore-Test *London Array* (rechts) im Frequenzbereich im Nahfeld (25 m bzw. ca. 20 m Entfernung zum Pfahl)**