

Fabian Wilke
Karin Kloske
Dr. Michael Bellmann

ESRa – Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl

Förderkennzeichen 0325307

Technischer Abschlussbericht



Mai 2012

Forschungsvorhaben: **Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl**
Zahlungsempfänger: **RWE Offshore Logistics Company (OLC) GmbH**
Förderkennzeichen: **0325307**
Laufzeit des Vorhabens: **01.03. 2011 – 31.12. 2011**
Projektträger: **PTJ, Forschungszentrum Jülich GmbH**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0325307 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Beteiligte Partner: **Bard Engineering**
DONG Energy
EnBW Erneuerbare Energien
E.ON Climate Renewables
EWE ENERGIE
RWE Innogy/RWE OLC (Projektleitung)
Stadtwerke München (SWM)
Vattenfall Europe

Schallmessung und
–auswertung:



Kurzzusammenfassung

Im Rahmen des ESra-Forschungsprojektes sind am Brodtener Pfahl in der Lübecker Bucht (Ostsee) das Handling und die Wirkungsweisen von **fünf unterschiedlichen Schallminderungssystemen** für den Bau von geramnten Offshore-Windenergieanlagen in einem Ringversuch getestet worden. Bei den Systemen handelte es sich um:

1. Rohr mit innen liegendem Blasenschleier der Fa. IHC (IHC NMS)
2. Feuerwehrschlauchmethode der Fa. Menck (Menck FWS)
3. Kleiner gestufter Blasenschleier der Fa. Weyres (engl. Little Bubble Curtain – Weyres LBC)
4. Schalldämmschalen mit zwei Blasenschleiern (modular aufgebaut) der Fa Weyres (Weyres BeKa-Schale)
5. System 5: Hydro Sound Damper der TU Braunschweig (TUBS) und Dr. Herrn Elmer (TUBS/Elmer HSD)

Alle Systeme wurden unter identischen Umwelt-Randbedingungen eingesetzt: Ziel war es, die mit einem einheitlichen Messkonzept ermittelten Schallminderungspotentiale miteinander vergleichen zu können. Die itap GmbH hat für das Projekt ein entsprechendes Mess- und Auswertungskonzept für Unterwasserschallmessungen in Anlehnung an das bestehende StUK 3 Konzept erarbeitet, sowie die Messungen durchgeführt und ausgewertet.

Alle getesteten Schallminderungssysteme haben signifikante Minderungseffekte erbracht. In dem für den Grenzwert relevanten Radius von 750 Metern um die Schallquelle herum und in dem Bereich des größten Energieeintrags von 100 – 300 Hertz liegt die Dämpfung bei 0 bis 10 Dezibel (dB) SEL. In dem für die Meeressäuger besonders sensiblen Hörbereich von Frequenzen bis etwa 5.000 Hertz liegt der Minderungseffekt bei maximal 25 dB.

Die breitbandige Reduktion des Einzelereignispegels (SEL) beläuft sich bei den Testsystemen auf 4,2 bis 6,1 dB. Korrigiert um den standortbedingten Bodeneinfluss wurden mit den Testsystemen **Minderungen des breitbandigen SEL von etwa 7 – 9 dB** erreicht.

Extended Abstract

For German wind farm project an underwater noise limit has been defined by the consenting authority BSH. It stipulates that the broad-banded sound exposure level (SEL) in 750 m distance from the driven pile shall not exceed 160 dB (re 1 μ Pa).

To meet this target **five different noise mitigation systems have been evaluated** in a round robin test within the ESRa research project. The five tested systems were

1. The noise mitigation screen from company IHC (IHC NMS). The system is a double-walled steel tube with air infill. Between the tube and the driven pile a bubble curtain can be generated.
2. The firehose system of company Menck (Menck FHS). The system comprises twolayer curtain made of firehoses which are inflated by compressed air.
3. The Little Bubble Curtain – company Weyres (LBC). A system that comprises multiple, bubble generating rings on different elevations of the water column around the driven pile.
4. A modular system consisting of two composite tubes with two internal bubble curtains – company Weyres (Weyres BeKa-Shell).
5. The Hydro Sound Damper of TU Braunschweig and Dr. Elmer (TUBS/Elmer HSD). It replaces air bubbles by fixed, firm bubbles of defined size and shape which are connected to a net.

All systems were to be tested under equal boundary conditions and with the same measurement concept. Therefore, the already driven pile “Brodten Ost” in the Baltic Sea has been chosen as the test pile. It is located close to the coast near Brodten in a water depth of 8.50 m. Further details can be found in the following Table.

Position	N 53 59.877' E 10 54.489'
Diameter	2.2 m
Height above waterline	5.5 m
Water depth	8.5 m
Embedment into soil	ca. 65.0 m
Wall thickness	50.0 mm

Table 1: Data of the test pile

In compliance with the StUK3 requirements the itap GmbH has developed a measurement and evaluation concept. With in total 4 buoys and at least two hydrophones over the water depth the data has been logged. Additionally, nearfield measurements and detection of soil vibration with a geophone have been performed.

All tests have been done with a hydraulic hammer Menck MHU 270 T with a rated energy of 300 kJ.

An overview of the achieved acoustic insertion loss (reduction of the SEL) over the frequency is given in the following Figure I. All systems worked well, but the figure shows that the achieved reductions are highly frequency dependent:

In the frequency range of 100 – 300 Hertz, where the highest energy is introduced in the water, the damping is between 0 and 10 Decibel (dB) SEL. In the for marine mammals most sensitive high frequency range up to 5'000 Hertz the reduction reaches values of up to 25 dB.

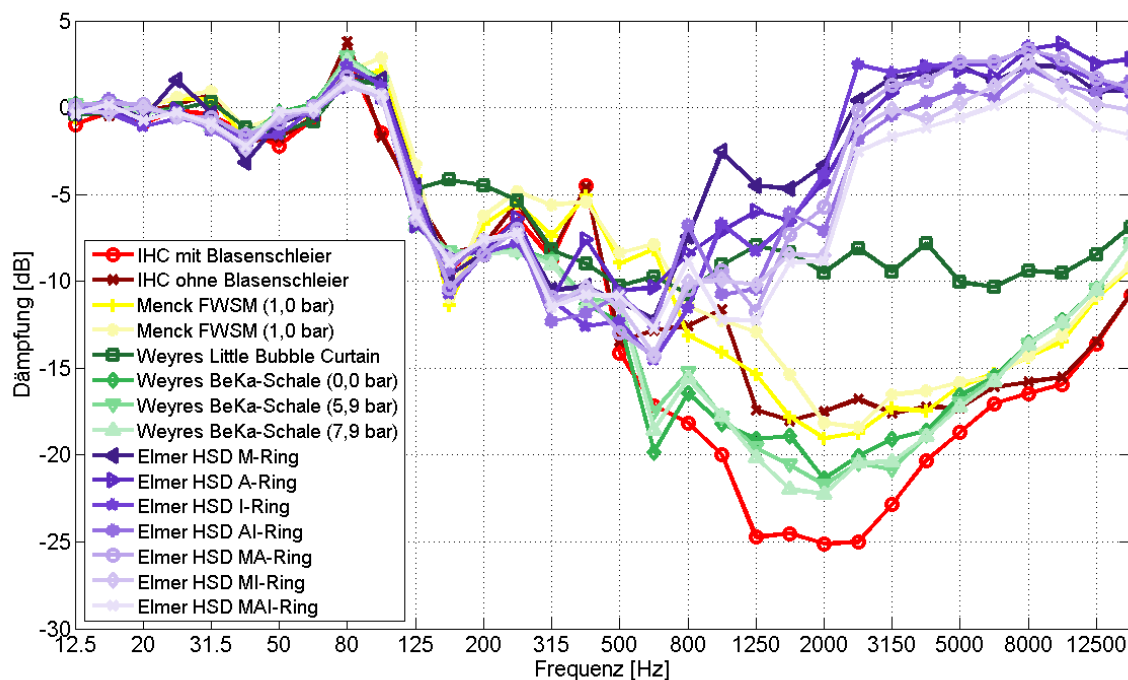


Figure I: Acoustic insertion loss (Δ SEL) in 1/3 octave bands at 750 m distance

The broad-banded reduction of the SEL is given in the following table. It is split up in nearfield and farfield (750 m) measurements. As already stated, the reduction is low in the most energy intensive frequency bands and thus the overall reduction of the SEL is below 10 dB for all systems.

However, due to the specific boundary conditions at the test location it is explained that the results need to be corrected by 2-3 dB, if the systems would be used on real scale projects with running piles. Therefore, it can be concluded that the tested systems have the potential of a **broad-banded reduction of 7 – 9 dB SEL**.

No	System	Description	Δ SEL [dB]		
			nearfield		Farfield
			distance 6 m	distance 13 m	distance 375 – 750 m
1	1	IHC NMS with bubble curtain	7.6	7.3	5.6
2		IHC NMS w/o bubble curtain	7.0	6.4	5.1
3	2	Menck FHS with 1,0 bar	10.9	6.4	5.0
4		Menck FHS with 2,0 bar	9.6	5.8	4.4
5	3	Weyres LBC	8.0	5.4	4.2
6	4	Weyres BeKa 0 bar	15.9	6.9	5.9
7		Weyres BeKa 5 bar	15.7	6.8	5.9
8		Weyres BeKa 7 bar	15.7	6.8	6.1
9	5	Elmer HSD M Ring	8.0	6.2	5.0
10		Elmer HSD O Ring	9.5	6.9	4.2
11		Elmer HSD I Ring	9.0	6.2	5.4
12		Elmer HSD MO Ring	10.8	7.5	5.4
13		Elmer HSD MI Ring	10.0	6.8	4.9
14		Elmer HSD OI Ring	11.8	7.4	5.4
15		Elmer HSD MOI Ring	13.8	7.6	5.4

Table II: Achieved reduction Δ SEL

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	10
Physikalische Größen	11
1. Einleitung und Aufgabenstellung	12
2. Schalltechnische Grundlagen	15
2.1 Pegelgrößen	16
2.1.1. (Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}	16
2.1.2. Einzelereignispegel L_E bzw. SEL	17
2.1.3. Spitzenpegel L_{peak}	18
2.2 Schallausbreitung in der Nordsee	19
2.2.1. Einfluss des Abstands	19
2.2.2. Einfluss der Wassertiefe	20
3. Stand der Technik beim Unterwasser-Schallschutz	21
4. Teststandort - Örtliche und technische Gegebenheiten	24
5. Equipment für die Offshore-Tests	28
5.1 Hammer	28
5.2 Arbeitsplattform Offshore	29
5.3 Druckluftkompressor	31
6. Schallminderungssysteme	33
6.1.1. IHC Schallminderungsrohr („Noise Mitigation Screen’)	34
6.1.2. „Feuerwehrschauchmethode“ der Fa. Menck	36
6.1.3. Little Bubble Curtain Weyres	41
6.1.4. BeKa-Schale Weyres	43
6.1.5. Hydro Sound Damper TU Braunschweig/Dr. Elmer	46
6.1.6. Gewichtsvergleich der Systeme	54
7. Durchführung der Hydroschall- und Erschütterungsmessungen	55

7.1	Versuchsaufbau und Messkonzept.....	55
7.2	Rammenergiemessung (PDM – Pile Drive Monitoring).....	61
7.3	Ablauf der Messungen	64
7.4	Auswertungsmethode der akustischen Daten (itap).....	68
7.5	Schallprognose	68
8.	Ergebnisse	71
8.1	Eingeleitete Rammenergie.....	71
8.2	Auswertung der Wassereigenschaften	71
8.3	Einfluss der unterschiedlichen Messpositionen auf den Einzelereignispegel (SEL).....	72
8.4	Einfluss der Schlagenergie auf den Einzelereignispegel (SEL)	74
8.4.1.	Summenpegel.....	74
8.4.2.	Schallminderung	76
8.5	Einfluss der Wassertiefe und der Entfernung zum Pfahl auf den Einzelereignispegel (SEL).....	78
8.6	Nah- und Fernfeldmessungen (itap)	81
8.6.1.	Ergebnisse der Schallminderungssysteme im Fernfeld	81
8.6.2.	Ergebnisse der Schallminderung im Nahfeld	90
8.7	Nahfeldmessungen TU BS (vgl. Appendix 2).....	98
8.7.1.	Eingesetztes Messequipment und Messpositionen	98
8.7.2.	Auswertungsprinzip der Hydroschallmessungen	99
8.7.3.	Ergebnisse der Hydroschallmessungen.....	101
8.8	Vergleich von Fernfeld- und Nahfeldmessungen	105
8.9	Messunsicherheiten und Toleranzen	107
9.	Diskussion der Ergebnisse	108
9.1	Vergleich zwischen dem Brodtener Pfahl (Standort für ESRa) und anderen Projektstandorten	108
9.1.1.	Randbedingungen Brodtener Pfahl.....	108
9.1.2.	Bodenkopplung („Preblow“)	110

9.1.3.	Vergleich eines ESRa –Schallminderungssystems an verschiedenen Standorten	117
9.1.4.	Einfluss der Wassertiefe	119
9.1.5.	Zwischenfazit	120
9.2	Stand der Wissenschaft im Bereich Schallminderungskonzepte bzw. Schallminderungssysteme	120
9.2.1.	Schallminderungssysteme im Überblick	120
9.3	Wie lassen sich die getesteten Schallminderungssysteme aus ESRa verbessern?	124
9.4	Fazit	126
10.	Zusammenfassung und Ausblick.....	129
11.	Verwendete Literatur, Richtlinien und Hilfsmittel	132
12.	Abbildungsverzeichnis.....	135
13.	Tabellenverzeichnis.....	142
14.	APPENDIX 1: Schallprognose Itap.....	143
15.	APPENDIX 2: Nahbereichsmessungen TUBS	156

Abkürzungsverzeichnis

A-Ring	äußerer Ring beim Elmer HSD
AI-Ring	äußerer + innerer Ring beim Elmer HSD
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
dB	Dezibel
Elmer HSD	Hydro Sound Damper der TU Braunschweig und Herrn Dr. Elmer
ESRa	Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl
I-Ring	innerer Ring beim Elmer HSD
IHC NMS	engl. Noise Mitigation Screen (Rohr mit innen liegendem Blasenschleier der Fa. IHC)
M-Ring	mittlerer Ring beim Elmer HSD
MI-Ring	mittlerer + innerer Ring beim Elmer HSD
MA-Ring	mittlerer + äußerer Ring beim Elmer HSD
MAI-Ring	mittlerer + äußerer + innerer Ring beim Elmer HSD
Menck FWS	Feuerwehrschauchmethode der Fa. Menck
MP	Messposition
NMS	Noise Mitigation System
OWEA	Offshore-Windenergieanlagen
PDM	Pile Driving Monitoring
StUK 3	Standard „Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt“
TUBS	TU Braunschweig
Weyres BeKa-Schale	Schalldämmschalen in Leichtbauweise mit zwei Blasenschleiern (modular aufgebaut) der Fa Weyres
Weyres LBC	(engl.) Little Bubble Curtain (kleiner gestufter Blasenschleier der Fa. Weyres)

Physikalische Größen

Größe	Beschreibung	Einheit
SEL	Sound Exposure Level, identisch mit dem Einzelereignispegel L_E	[dB]
Z	Kennimpedanz	Rayl [10Ns/m ³]
p	Schalldruck	[Pa]
ρ	Dichte des Mediums	[Kg/m ³]
L_{eq}	(Energie-) äquivalenter Dauerschalldruckpegel	[dB]
L_E	Einzelereignispegel, (identisch mit dem Sound Exposure Level – SEL)	[dB]
L_{peak}	Spitzenschalldruckpegel	[dB]
$p(t)$	zeitlich verändernder Schalldruck	[Pa]
p_0	Bezugsschalldruck (bei Unterwasserschall 1 μ Pa)	[Pa]
T	Mittelungszeit	[s]
T_0	Bezugswert 1 Sekunde	[s]
n	Anzahl der Rammschläge,	dimensionslos
L_{hg}	Stör- bzw. Hintergrundpegel zwischen den einzelnen Rammschlägen	[dB]
$ p_{peak} $	maximal festgestellter Betrag (positiver oder negativer) Schalldruck	[Pa]
TL	Durchgangsdämpfung; engl. <u>T</u> ransmission <u>L</u> oss	[dB]
k	Konstante (für die Nordsee $k = 15$)	dimensionslos
λ	Wellenlänge der Schallwelle	[m]
R	Abstand vom Pfahl	[m]
f_s	Samplingfrequenz	[Hz]
ΔSEL	Differenz im SEL zwischen der Anwendung ohne (Referenz) und mit Schallminderungskonzept	[dB]
ΔL_{peak}	Differenz im Spitzenpegel zwischen der Anwendung ohne (Referenz) und mit Schallminderungskonzept	[dB]
f_g	Grenzfrequenz für die Ausbreitung von Schall bei kontinuierlicher Anregung	[Hz]
h	Wassertiefe	[m]
c_{Wasser}	Schallgeschwindigkeit im Wasser	[m/s]
$c_{Sediment}$	Schallgeschwindigkeit im Sediment	[m/s]
f	Frequenz des Schalls	[Hz]

Tabelle 1: Übersicht über die wesentlichen verwendeten physikalischen Größen und Parameter sowie deren Einheiten.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Derzeit sind für die regenerative Energieerzeugung knapp 30 Offshore-Windparkprojekte im deutschen Küstenmeer und in der deutschen AWZ genehmigt und darüber hinaus zahlreiche weitere für die Zukunft geplant. Die Errichtung soll sowohl in der Ostsee als auch in der Nordsee erfolgen.

Offshore-Windparks werden in der Regel mit Hilfe von gerammten Gründungsstrukturen errichtet. Typischerweise finden diese Baumaßnahmen im Offshore-Bereich hauptsächlich unterhalb der Wasseroberfläche statt. Die aus dem Rammen konventioneller Fundamente resultierenden Schallimmissionen werden von den Behörden aus naturschutzfachlicher Sicht insbesondere für marine Säuger als problematisch eingeschätzt. Die in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) zuständige Genehmigungsbehörde (BSH) hat in den existierenden Genehmigungen in einer Nebenbestimmung verfügt, dass bei der Gründung und Installation der Anlagen diejenige Arbeitsmethode nach dem Stand der Technik zu verwenden ist, die nach den vorgefundenen Umständen so geräuscharm wie möglich sei. Dabei wird auf einen Immissionsgrenzwert Bezug genommen, der insbesondere für die Rammarbeiten von Bedeutung ist; er liegt bei 160 dB (SEL) in 750 m Entfernung zur Emissionsquelle. Je nach Datum der Genehmigung ist dieser Wert in der Begründung der entsprechenden Nebenbestimmung als „anzustreben“ genannt, teilweise findet er sich – bei den neueren Genehmigungen – als „einzuhalten“ direkt im verfügenden Teil der Genehmigung.

Somit zeichnet sich in der Diskussion mit Meeresbiologen und Genehmigungsbehörden ab, dass bei der Herstellung der Gründungen von zukünftigen Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) der Einsatz von praktikablen Schallminderungsmaßnahmen bei Rammarbeiten unverzichtbar sein wird. Gleichzeitig existiert zurzeit noch kein "Stand der Technik", der den Schallschutz auf dem geforderten Niveau bei Rammarbeiten im marinen Bereich sicherstellt. Theoretisch in Betracht kommende, neuartige Schallminderungstechniken befinden sich häufig noch im Konzeptstatus, sind großtechnisch oft noch nicht ausgereift und daher nicht am Markt verfügbar.

Im Hinblick auf die zu erwartende Größenordnung in Abmessung und Anzahl dieser Gründungsstrukturen in Nord- und Ostsee, ist die Auswahl, Erprobung, Wirksamkeit und Handhabbarkeit von Schallminderungsmethoden von entscheidender Bedeu-

tung, um effektive und wirksame Minderungsmaßnahmen mit einem vertretbaren Kostenaufwand auf hoher See realisieren zu können.

Dazu ist eine vorhergehende Erprobung und Optimierung von geeigneten Schallminderungsmaßnahmen im realen Maßstab erforderlich, die zunächst vorzugsweise küstennahen Bereich mit wesentlich geringerem Aufwand durchgeführt werden sollte. Aus diesem Grund haben sich unter der Federführung der RWE OLC GmbH insgesamt 8 Errichter und Betreiber deutscher Offshore-Windparks zusammengefunden (Bard Engineering, DONG Energy, EnBW Erneuerbare Energien, E.ON Climate Renewables, EWE ENERGIE, RWE Innogy, Stadtwerke München, Vattenfall Europe), um mit dem Vorhaben ESRa durch die industrieweite Kooperation einen großen Multiplikator für das gewonnene Wissen zu schaffen.

Ziel des Vorhabens ESRa ist die Identifikation, Erprobung und Evaluation von neuartigen Konstruktions- und Betriebskonzepten für einen sicheren, praktisch handhabbaren und kostentechnisch darstellbaren Schallschutz beim Bau von geramnten Offshore-Windenergieanlagen.

Dabei sollen Schallminderungssysteme verschiedener Hersteller und unterschiedlichen Entwicklungsstadiums an einem großmaßstäblichen Testpfahl erprobt werden. In dem geplanten Vorhaben soll zum ersten Mal eine größere Anzahl von Systemen (ca. 4-5) unter identischen Umwelt-Randbedingungen eingesetzt und deren mit einem einheitlichen Messkonzept ermitteltes Schallminderungspotential miteinander verglichen werden. Mit der Entwicklung des Messkonzeptes und der Durchführung der Messungen wurde die itap (Institut für technische und angewandte Physik) GmbH beauftragt. Dabei sollen die Messungen und die Auswertungen der Unterwasserschallimmissionen in Anlehnung an das bestehende Standarduntersuchungskonzept (StUK 3 [1]) des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt werden. Zusätzlich zu den Hydroschallmessungen sollen ebenfalls Erschütterungsmessungen am Sediment in der Nähe des geramnten Pfahles durchgeführt werden.

Anhand der Messergebnisse und der Erfahrungen bei der Anwendung der verschiedenen Schallschutzkonzepte sollen – soweit auf Basis der gewonnenen Daten möglich – Empfehlungen für Systeme abgeleitet werden, die eine sichere Einhaltung der derzeit diskutierten Grenzwerte in Aussicht stellen und gleichzeitig eine großtechni-

sche Umsetzung und Einbindung in die Installationslogistik erlauben. Die dabei gewonnenen Ergebnisse können die Grundlage für weitere Versuche im Realmaßstab sein und den Windparkbetreibern als Hilfe bei der Eingrenzung von potentiell geeigneten Schallminderungssystemen dienen.

2. Schalltechnische Grundlagen

Schall ist eine rasche, oft periodische Schwankung des Drucks, die dem Umgebungsdruck (im Wasser also dem hydrostatischen Druck) additiv überlagert ist. Damit einher geht eine „Hin-und-Her-Bewegung“ der Wasserteilchen, die üblicherweise durch deren Geschwindigkeit, der sogenannten Schallschnelle v (engl. particle velocity), beschrieben wird. Die Schallschnelle kennzeichnet die Wechselgeschwindigkeit, mit der ein Teilchen um seine Ruhelage in einem Medium schwingt. Die Schallschnelle ist nicht mit der Schallgeschwindigkeit c_{Wasser} , also der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalles in einem Medium zu verwechseln, die in der Regel bei Wasser im Bereich von $c_{\text{Wasser}} = 1500 \text{ m/s}^2$ liegt. I. d. R. ist die Schallschnelle v deutlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit c .

Schalldruck p und Schallschnelle v sind über die akustische Kennimpedanz Z , die den Wellenwiderstand des Mediums charakterisiert, folgendermaßen verknüpft:

$$Z = \frac{p}{v} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Im Fernfeld, d. h. in einigem Abstand (frequenzabhängig) von der Schallquelle, ist die Impedanz gegeben durch:

$$Z = \rho c \quad \text{Gl. 2.2}$$

mit

ρ - Dichte des Mediums.

Für eine Schalldruckamplitude von beispielsweise 1 Pa (entspricht bei einem sinusförmigen Signal einem Schalldruckpegel von 117 dB re 1 μPa bzw. einem Spitzenpegel von 120 dB re 1 μPa , siehe Kapitel 2.1) erhält man daraus für die Schallschnelle in Wasser einen Wert von ca. 0,7 $\mu\text{m/s}$.

2.1 Pegelgrößen

In der Akustik wird die Intensität von Geräuschen in der Regel nicht direkt durch die Messgröße Schalldruck (oder Schallschnelle) beschrieben, sondern durch den aus der Nachrichtentechnik bekannten Pegel in dB (Dezibel). Allerdings gibt es verschiedene Schallpegelgrößen. Für die vorliegende Untersuchung im Zusammenhang mit der StUK3 [1] sind folgende Pegelgrößen von Bedeutung:

- (Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}
- Einzelereignispegel L_E (identisch mit dem Sound Exposure Level – SEL)
- Spitzenpegel L_{peak}

Der L_{eq} und der L_E bzw. SEL können sowohl frequenzunabhängig angegeben werden, d. h. als breitbandige Einzahlwerte, als auch frequenz aufgelöst, z. B. in 1/3-Oktav-Bändern (Terzspektrum). Mit dem vom BSH genannten Richtwert bei Rammarbeiten von 160 dB in 750 m Entfernung ist der breitbandige Einzelereignispegel L_E bzw. SEL (Einzahlwert) gemeint.

Im Folgenden werden die o. g. Pegelgrößen kurz beschrieben.

2.1.1. (Energie-) Äquivalenter Dauerschallpegel L_{eq}

Der L_{eq} ist die gebräuchlichste Messgröße in der Akustik und ist definiert als

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad [\text{dB}] \quad \text{Gl. 2.3}$$

mit

$p(t)$ - zeitlich veränderbarer Schalldruck

p_0 - der Bezugsschalldruck (bei Unterwasserschall 1 μPa)

T - die Mittelungszeit.

In Worten bedeutet Gleichung 2.3: Quadriere die beobachteten zeitlich veränderbaren Schalldrücke $p(t)$, bilde den Mittelwert über die Zeit T und teile durch den quadrierten Bezugsschalldruck p_0^2 (energetische Mittelung). Der mit 10 multiplizierte Logarithmus von diesem Wert ist der energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} in dB.

2.1.2. Einzelereignispegel L_E bzw. SEL

Zur Charakterisierung von Rammgeräuschen ist der L_{eq} allein kein ausreichendes Maß, da er nicht nur von der Stärke der Rammschläge abhängt, sondern auch von der Mittelungszeit und von den Pausen zwischen den Rammschlägen. Besser geeignet ist der Einzelereignispegel L_E bzw. engl. Sound Exposure Level - SEL (im deutschen Sprachraum wird vorwiegend der Einzelereignispegel L_E verwendet), der folgendermaßen definiert ist:

$$SEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad [\text{dB}] \quad \text{Gl. 2.4}$$

mit

T_1 und T_2 - Anfangs- bzw. Endzeit der Mittelungen (sind so zu wählen, dass das Schallereignis zwischen T_1 und T_2 liegt, etwa 0,05 – 0,40 s in Abbildung 1)

T_0 - Bezugswert 1 Sekunde

Der Einzelereignispegel eines Schallimpulses (Rammschlag) ist damit der Pegel (L_{eq}) eines kontinuierlichen Schalls von 1 s Dauer und der gleichen Schallenergie wie der Impuls.

Der SEL bzw. L_E ist schwieriger direkt zu messen als der L_{eq} , die beiden Größen können jedoch einfach ineinander umgerechnet werden:

$$SEL = 10 \log \left(10^{L_{eq}/10} - 10^{L_{hg}/10} \right) - 10 \log \frac{nT_0}{T} \quad [\text{dB}] \quad \text{Gl. 2.5}$$

mit

n - Anzahl der Schallereignisse, also der Rammschläge, innerhalb der Zeit T

T_0 - 1 s

L_{hg} - Stör- bzw. Hintergrundpegel zwischen den einzelnen Rammschlägen

Die Gleichung 2.5 liefert somit aus einer L_{eq} -Messung den mittleren Einzelereignispegel SEL bzw. L_E von n Schallereignissen (Rammschlägen). Im Falle, dass der Hin-

tergrundpegel zwischen den Rammschlägen deutlich geringer als der Rammschall ist (z. B. > 10 dB), kann mit hinreichender Genauigkeit mit einer Vereinfachung von Gleichung 2.5 folgendermaßen gerechnet werden:

$$SEL \approx L_{eq} - 10 \log \frac{nT_0}{T} \quad [\text{dB}] \quad \text{Gl. 2.6}$$

2.1.3. Spitzenpegel L_{peak}

Diese Größe ist ein Maß für Schalldruckspitzen. Im Gegensatz zu L_{eq} und L_E bzw. SEL gibt es keine Mittelwertbildung:

$$L_{peak} = 20 \log \left(\frac{|p_{peak}|}{p_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad \text{Gl. 2.7}$$

mit

p_{peak} - maximal festgestellter positiver oder negativer Schalldruck

Ein Beispiel ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Spitzenpegel L_{peak} ist stets höher als der Einzelereignispegel. In der Regel beträgt der Unterschied zwischen dem L_{peak} und dem SEL bei Rammarbeiten 20 dB bis 25 dB [2]. Einige Autoren bevorzugen statt des L_{peak} s die Größe Peak-to-Peak-Wert, in Abbildung 1 ist ebenfalls eine Definition dieser Größe dargestellt.

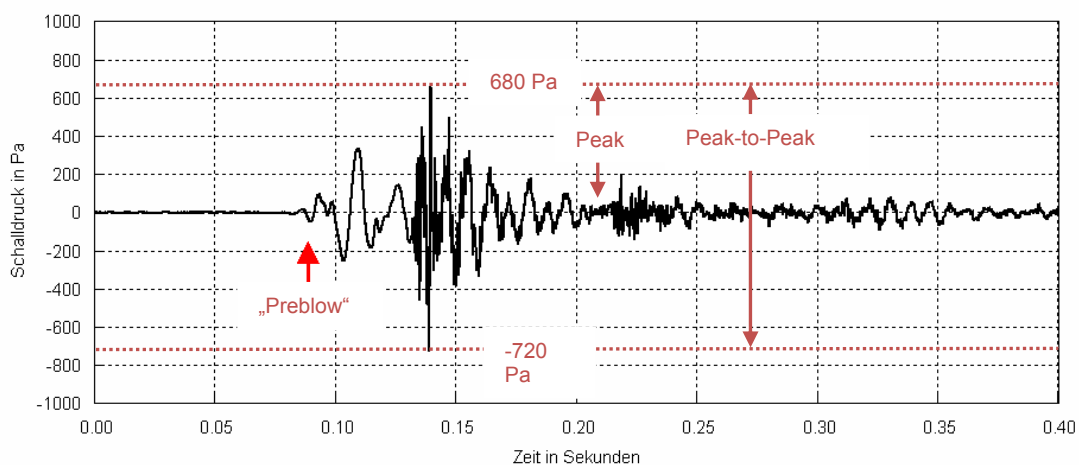


Abbildung 1: Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei einem Rammschlag in einigen 100 Metern Entfernung.

2.2 Schallausbreitung in der Nordsee

2.2.1. Einfluss des Abstands

Für überschlägige Rechnungen kann man annehmen, dass der Schalldruck mit der Entfernung nach einem einfachen Potenzgesetz abnimmt. Der Pegel in dB verringert sich dann um:

$$TL = k \cdot \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ [dB]} \quad \text{Gl. 2.8}$$

mit

- r_1 und r_2 - Entfernung zur Schallquelle vergrößert sich von r_1 auf r_2
- TL - Durchgangsdämpfung; engl. Transmission Loss
- k - Konstante (für die Nordsee kann $k = 15$ angesetzt werden, für die Ostsee wird für grobe Abschätzungen ebenfalls $k = 15$ angesetzt)

Häufig wird die Durchgangsdämpfung bzw. TL für einen Abstand $r_1 = 1$ m (fiktiver Abstand zur punktförmig gedachten Quelle) angegeben. Die daraus zu berechnende Schalleistung eines Rammschlages in 1 m Entfernung wird oftmals auch als Quellpegel bezeichnet. Gleichung 2.8 vereinfacht sich dann zu $TL = k \log(r/\text{Meter})$. Diese einfache Rechnung berücksichtigt allerdings nicht, dass die Abnahme des Schalldrucks mit der Entfernung auch von der Frequenz abhängt. Zusätzlich ist zu beachten, dass die o. g. Formel nur für das „Fernfeld“ eines akustischen Signals gilt, d. h. in einem Abstand (frequenzabhängig) von der Quelle.

Kommentar: In Luft liegt die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld frequenzabhängig bei ca. 2λ (λ – Wellenlänge; frequenzabhängig; [3]). Für Unterwasserschall bei Ramnungen von Windenergieanlagen existieren keine detaillierten Studien von Nah- und Fernfeld. Es ist zu erwarten, dass die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld im Bereich 2λ bis 10λ liegen wird.

Zusätzlich macht sich bei Abständen von einigen Kilometern die Absorption im Wasser bemerkbar und bewirkt eine weitere Verringerung des Schalldrucks. Des Weiteren hat bei solch großen Entfernungen das Wetter einen Einfluss auf den Schallpegel im Wasser; bei starkem Wind und Seegang ist der Schalldruckpegel niedriger. Dies

liegt an der größeren Oberflächenrauigkeit des Meeres und vor allem an dem erhöhten Lufteintrag durch Wellenschlag in die obere Meeresschicht.

Von Thiele und Schellenstede [4] haben Näherungsformeln zur Berechnung der Schallausbreitung für verschiedene Gebiete der Nordsee sowie für „glatte“ und für „raue“ See veröffentlicht (aus [6]):

$$TL = (16.07 + 0.185F)(\log(R) + 3) + (0.174 + 0.046F + 0.005F^2)R \quad [\text{dB}] \quad \text{Gl. 2.9}$$

mit

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

R – Abstand

Strenggenommen gelten die Zusammenhänge aus Gleichung 2.9 nur für winterliche Bedingungen mit guter Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil in der Nordsee (deutsche Bucht). Für die Ostsee existieren keinerlei Formeln bzw. Abhängigkeiten zur Berechnung der Abschwächung als Funktion des Abstandes. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine vollständige Durchmischung des Wassers, sowie kein ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil im Untersuchungsgebiet (hier Ostsee, *Lübecker Bucht*) vorliegt. Aus diesem Grund wird hier für die vorliegende Lokation die Formel von Thiele und Schellenstede [4] (Gleichung 2.9) ebenfalls für überschlägige Berechnungen in Kapitel 8 angewendet.

2.2.2. Einfluss der Wassertiefe

Die Schallausbreitung im Meer wird ebenfalls von der Wassertiefe beeinflusst. Unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ist keine kontinuierliche Schallausbreitung möglich; je flacher das Gewässer umso höher ist diese Frequenz. In 10 m tiefen Wasser liegt die Grenzfrequenz f_g je nach Sedimenttyp in der Größenordnung von 100 Hz [6]. Schall in der Nähe der Grenzfrequenz wird mit wachsender Entfernung zur Schallquelle stärker abgeschwächt bzw. gedämpft als z. B. durch Gleichung 2.9 berechnet.

3. Stand der Technik beim Unterwasser-Schallschutz

Rammen, insbesondere bei Verwendung von Hydraulik-Hämmern, erzeugt hochfrequenten Schall mit beträchtlichem Pegel [7]. Ein derartiger Impulsschall wird üblicherweise durch zwei Schallpegel beschrieben. Ersterer ist der im vorherigen Kapitel beschriebene Spitzenpegel des maximal auftretenden, momentanen positiven oder negativen Schalldrucks. Die zweite Größe zur Beschreibung des Unterwasser-Schalls ist der Einzelereignis-Schalldruckpegel SEL.

Verschiedene Messungen bei Offshore-Rammungen von Forschungsplattformen und Gründungsstrukturen von Windenergieanlagen in Nord- und Ostsee haben Unterwasser-Schallpegel SEL ergeben, welche den derzeit geforderten Grenzwert von 160 dB regelmäßig um mehr als 10 dB übersteigen. Für die Minderung von Schallimmissionen sind grundsätzlich zwei Ansätze zu unterscheiden: Die Verringerung der Quellstärke und die Reduktion der Schallausbreitung. Dem erstgenannten Lösungsweg (z.B. Verlängerung der Impulsdauer) sind bei den für die relevanten Fundamentdimensionen benötigten Rammenergien enge verfahrenstechnische Grenzen gesetzt. Folgerichtig sind derzeit im Wesentlichen Schallausbreitungsminderungsansätze dokumentiert, worunter auch Absorberkonzepte fallen. Das Minderungsprinzip beruht auf dem Einbringen einer Schicht in den Schallweg, die einen akustischen Impedanzsprung bewirkt und die Schallenergie teilweise absorbiert, also in Wärme umsetzt.

Als bisher einziges, praktisch erprobtes Verfahren zur Schallminderung von wasserbaulichen Maßnahmen (küstennahe Brücken und Hafenbaustellen) wurde in der Vergangenheit der Blasenschleier angewendet. Es zeigte sich ein dämpfender Effekt, welcher aber nicht ohne weiteres auf die Situation der Offshore-Windenergieanlagen zu übertragen ist. In Gewässern mit Tidenströmung ergibt sich zudem das Problem, die Blasen sicher im Schallweg zu halten. Sowohl der „Große Blasenschleier“ als auch der „Kleine, gestufte Blasenschleier“ wurden in den letzten Jahren im Rahmen verschiedener, weiter unten aufgeführter Forschungsprojekte der Windenergieindustrie erprobt. Die maximale Schallreduktion der Blasenschleier betrug etwa 12 dB, wobei letzteres Verfahren aufgrund technischer Probleme nicht vollständig umgesetzt werden konnte. Die Untersuchungen weiterer Schallminderungssysteme, wie z.B. die Ummantelung des Ramppfahles mit Dämmmaterial oder die

Verlängerung des Schlagimpulses zeigten im Bezug auf den Hydroschalleintrag durchweg geringere Dämpfungseffekte als die Blasenschleier.

Aus dem bisherigen Einsatz dieser Schallminderungssysteme kann als Fazit gezogen werden, dass grundsätzlich eine Reduktion des Hydroschalls von etwa 10 dB mit hoher Wahrscheinlichkeit erbracht werden kann. Auf dieser Grundlage ergibt sich als Schlussfolgerung für den derzeitigen Stand der Technik, dass derzeit für die meisten Anwendungsfälle kein Schallminderungssystem existiert, das die entsprechend BSH anzustrebenden Grenzwerte einhält.

Grundlage für die inhaltliche Ausrichtung des geplanten Vorhabens waren u.a. die Ergebnisse der im Folgenden aufgeführten Forschungsprojekte:

- Untersuchungen im Rahmen der Installation der Forschungsplattform FINO 1 ([8] Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen, 2004)
- Erfahrung bei Anwendung verschiedener Schallminderungssysteme bei einem Testpfehl in der Ostsee ([9] Minderung des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten für Offshore-WEA – Praktische Erprobung verschiedener Verfahren unter Offshore-Bedingungen, 2006)
- Schallmessungen am Messmast Amrumbank West und an einer Hafenbaustelle. ([7] Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen, Projekt „Schall 2“, 2007)
- Untersuchung von Schallminderungsmaßnahmen an der Messplattform FINO 2 ([10] Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 0329947b, 2007)
- Untersuchungen zur Konzeption, Erprobung, Realisierung und Überprüfung von lärmarmen Bauverfahren und Lärminderungsmaßnahmen bei der Gründung von Offshore-Windenergieanlagen ([11] Projekt „Schall 3“, 2010)
- Einsatz des „Großen Blasenschleiers“ bei der Forschungsplattform FINO 3. ([12] Abschlussbericht zum BMU Vorhaben "Erforschung und Anwendung von Schallminimierungsmaßnahmen beim Rammen des FINO3-Monopiles - Schall FINO3", 2010)

- Erforschung der Schallminderungsmaßnahme "Gestuffer Blasenschleier (Little Bubble Curtain)" im Testfeld alpha ventus ([13] Verbundprojekt im Rahmen von alpha ventus, 2010).

4. Teststandort - Örtliche und technische Gegebenheiten

Der Testpfahl „Brodten Ost“ befindet sich in der Lübecker Bucht in der Nähe von Travemünde, etwa 2,4 km nordöstlich vom Brodtener Ufer (Abbildung 2 und Abbildung 3). Er hat die Koordinaten 53°59,9'N 010°54,6'E.

Der Pfahl wurde von der Menck GmbH in den 1980er Jahren zu Testzwecken errichtet. Die Wassertiefe beträgt am Standort etwa 8,5 m mit einer Schwankungsbreite von $\pm 0,50$ m. Ein Wassertiefenverlauf in der Umgebung des Pfahles kann Abbildung 4 entnommen werden. Der Pfahl ist ein Stahlrohr mit 2,139 m Durchmesser und 50 mm Wandstärke. Die Einbindetiefe im Meeresboden beträgt nach Auskunft von Menck [14] mehr als 65,0 m. Die verbleibende Pfahllänge über dem Seegrund beträgt 13,30 m, so dass er bei der im Vorfeld gemessenen Wassertiefe von 8,20 m noch 5,10 m aus dem Wasser ragte. Ein weiteres Eindringen in den Boden durch zusätzliche Rammschläge ist mit dem verwendeten Hammer nicht zu erwarten.



Abbildung 2: Der Testpfahl in der Nähe von Travemünde.

Die weiße Haube dient der besseren Sichtbarkeit für die Schifffahrt und wird für Rammversuche abgenommen (Fotos aus [9]).



Abbildung 3 Geografische Position des Testpfahls in der Lübecker Bucht (Quelle: [14]).

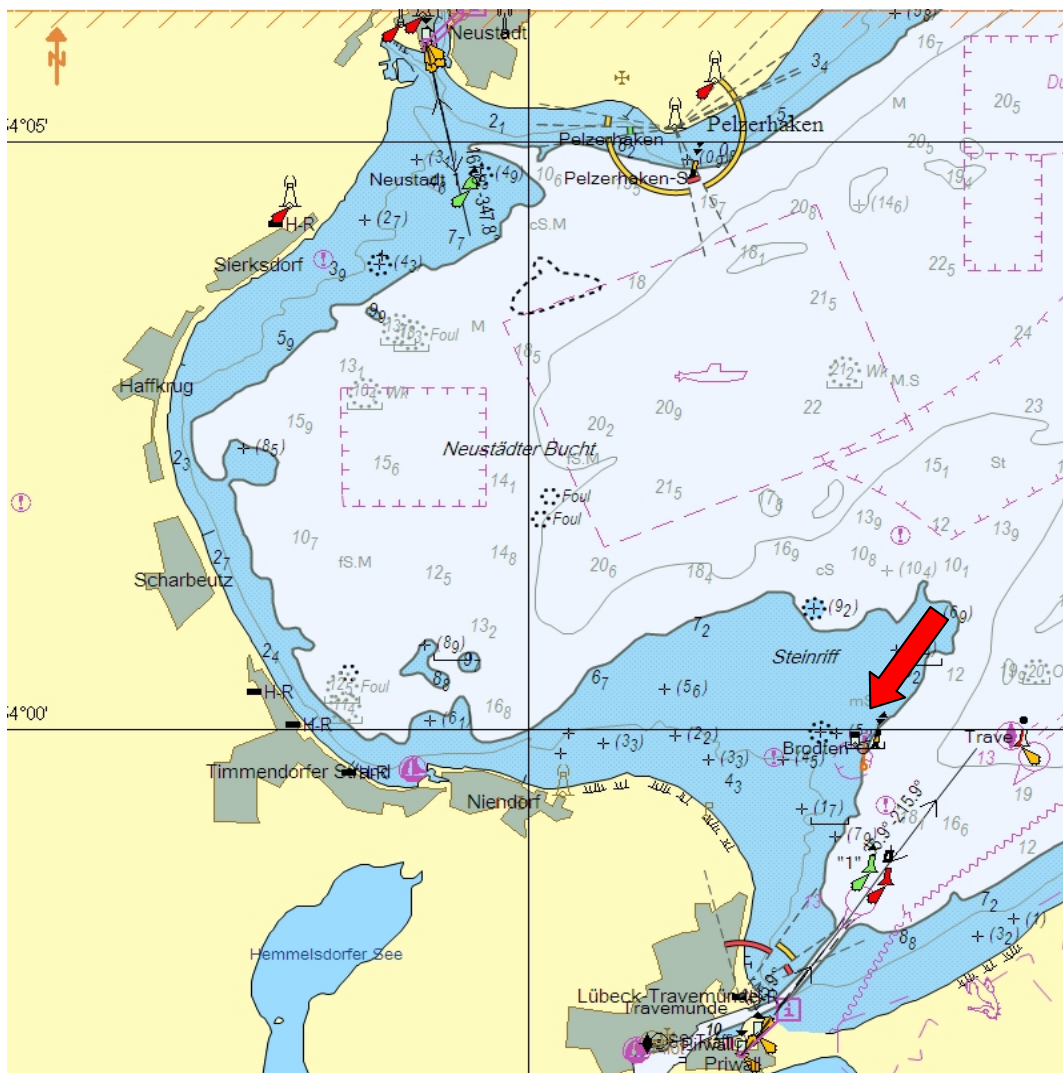


Abbildung 4: Kartenausschnitt Lübecker Bucht [15] mit Kennzeichnung Testpfahl in der Nähe der Kardinaltonne Brodten-Ost

Besonders wichtig war es auch, die in einiger Entfernung zum Testpfahl auszulegenden Messinstrumente gegen unmittelbaren Hintergrundschall (Störschall von vorbeifahrenden Motorfahrzeugen) und unbefugtes Entfernen zu sichern, sowie sonstige Schaulustige aus dem Testbereich heraus zu halten. Zu diesem Zwecke wurde die Einrichtung eines Sperrgebietes beim WSA Lübeck beantragt und genehmigt.

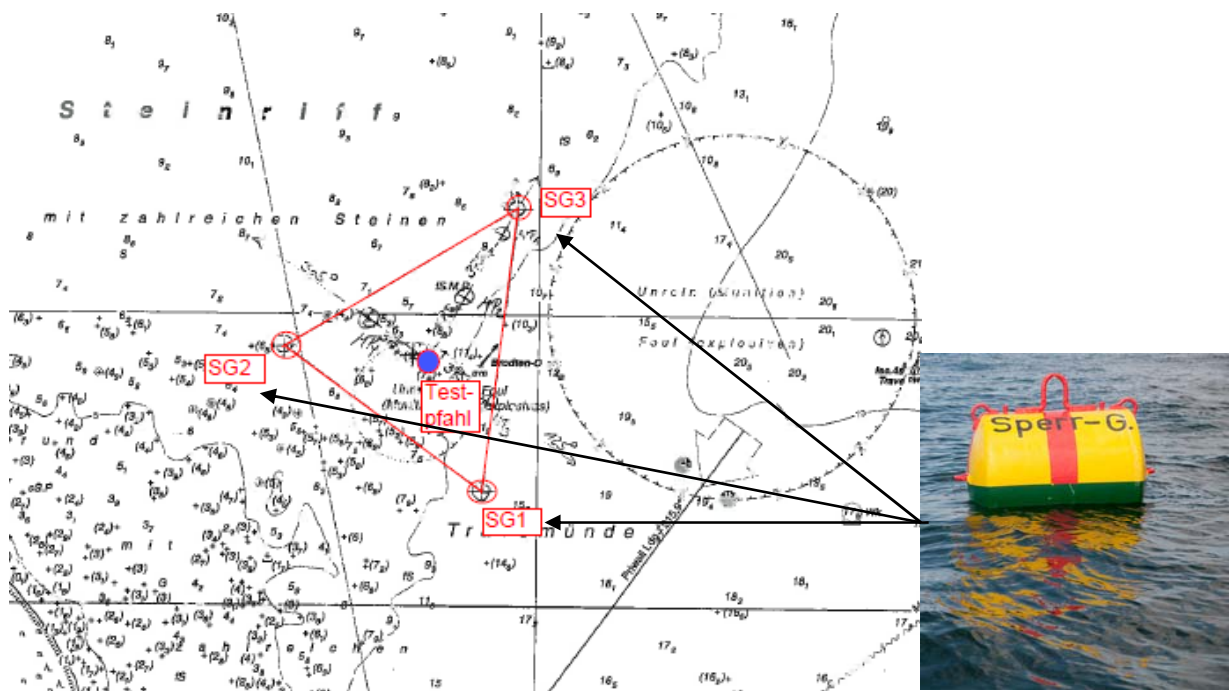


Abbildung 5: Lage des Sperrgebiets am Testpfahl

Eine ungefähre Boden-Stratigraphie aus dem Jahre 1985 wurde von der Fa. Menck zur Verfügung gestellt (Tabelle 2). Diese basiert nicht auf lokalen Bodenuntersuchungen sondern wurde mit Hilfe von fachlichen Publikationen und Bodenuntersuchungen in der näheren Umgebung erstellt. Eine genaue Angabe der Schichtdicken der einzelnen Bodenarten ist nicht vorhanden. Von Bedeutung für die ESRa-Feldversuche ist die in Tabelle 2 dargestellte mögliche Einlagerung von interglazialen Tonen (Beckenton) in den Geschiebemergel. Diese Einlagerungen werden vermutlich linsenförmig auftreten, Dimensionen sind jedoch nicht bekannt. Aus akustischer Sicht würde eine wenig steife, langsame Beckentonschicht die Schallabstrahlung aus der schnellen (deutlich steiferen) Geschiebemergelschicht verhindern. In diesem Fall wäre zu vermuten, dass ein größerer Teil der in den Beckenton eingebrachten Schallenergie über Reflektionen wieder in das Wasser eingebracht wird.

Tiefe bezogen auf NN		Geologische Schicht	Bodenschicht	Steifeziffer
von	bis			
-NN [m]	-NN [m]	–	–	MN/m ²
-8,5	10,5	Holozän	Sand und Kies	–
-10,5	-63,5	Pleistozän	Geschiebemergel	50 – 300
			Beckenton	5 – 50
			Pleistozäne Sande und Kiese	80 – 100
-63,5	-300	Tertiär	Tarraston	2 – 4
			Glimmerton	4 – 10
			Mittel- und Feinsande	–

Tabelle 2: Bodenverhältnisse am Testpfahl Brodten Ost.

5. Equipment für die Offshore-Tests

5.1 Hammer

Für die eigentliche Durchführung der Tests bedurfte es neben der Arbeitsplattform eines geeigneten Rammhammers. Dieser sollte in der Lage sein, Energie in einer Größenordnung in den Pfahl einzutragen, die einen Schallpegel, durchaus vergleichbar mit dem bei Rammung von Offshoregründungen erzeugte. Die Wahl fiel auf den MHU-270 T der Fa. MENCK. Dieser Hammer musste mittels Rammhaubenadapter und Rammhaube an den Pfahldurchmesser von 2,139 m angepasst werden. Auf das Unterwassergewicht konnte verzichtet werden, da der Testpfahl noch aus dem Wasser heraus ragte. Es musste lediglich dafür Sorge getragen werden, dass die Rammhaube nicht zu lang war und somit mit den Testgeräten, die ja bis zur Wasseroberfläche gehen sollten, in Konflikt kam. Der Rammhammer kam zusammen mit dem Rammhaubenadapter und der Rammhaube auf ein Gesamtgewicht von 63 to. Es ist hier wichtig festzuhalten, dass der Hammer aufgrund der missverständlichen Namensgebung im Betrieb über Wasser eine maximale Schlagenergie von 300 kJ entwickelt (vergleiche Abbildung 6).

MHU deepwater series

	Unit	270T	400T	500T	750T
Minimum energy	kJ	30	40	50	75
Maximum energy - surface	kJ	300	440	550	820
Maximum energy - 1000 m depth	kJ	270	400	500	750
Oil flow	l/min	600	1000	1150	1600
Blow rate at max energy	bl/min	40	38	38	38
Ram weight	t	16.2	24.3	30.2	45.4
Total hammer weight	t	30.8	49.1	59.8	79.6
Standard Configuration					
Pile sleeve		1.6 m	60"	2.2 m	84"
Total weight dry w/MHP DWS	t	66	85.8	113.7	147.8
Total weight under water	t	52.5	75.5	90	118.3
Hammer length w/pile sleeve	m	12.7	14.5	16	17.6

Abbildung 6: Hammerspezifikation MHU 270 T (Quelle: www.menck.com)



Abbildung 7: Auf den Pfahl aufgesetzter Hammer (Foto: Patrice Kunte)

5.2 Arbeitsplattform Offshore

Für die Durchführung der Tests wurde unterschiedliches Equipment benötigt. Neben dem Rammhammer mit seinem Zubehör musste noch ein Raupenkran, ein Luftkompressor, Bürocontainer und mindestens ein Testgerät vor Ort bereit gehalten werden. Aus diesem Grund war eine stabile Arbeitsplattform unverzichtbar, um sowohl den Rammhammer, als auch die Testgeräte zu transportieren, nahe des Testpfahls stabil zu halten und zu bedienen. Alternativ kam auch ein Installationsschiff, mit oder ohne eigenen Antrieb, wie es zur Installation von Gründungsstrukturen bei Offshore-Windparks zum Einsatz kommt, in Frage. Aufgrund der jahreszeitlichen Bedingungen an der Testlokation mit nur geringer Wellenhöhe und der moderaten Wassertiefe, fiel die Entscheidung für die Durchführung der Arbeiten mit einem Stelzenponton ohne eigenen Antrieb. Im Gegensatz zu Installationsschiffen mit hydraulisch verfahrbaren Hubbeinen (Jack-Ups), besitzt ein Stelzenponton 2-4 ablassbare Beine, die seine Position im Seegang stabilisieren aber nicht vollständig unterdrücken.

Der verwendete Arbeitsponton RHR 1 der Arbeitsgemeinschaft ‚Logistik‘ (TAGU/HOCHTIEF), in Abbildung 8 dargestellt, bot zusätzlich zur Unterbringung des oben aufgeführten Equipments noch Platz für zwei Arbeitsboote, zwei Dieseltanks, insgesamt 5 Container und ein zweites Testgerät. Als Basishafen für Mobilisierung und Umladung der Testgeräte wurde Neustadt gewählt (Abbildung 9).



Abbildung 8: Stelzenponton RHR 1 mit Ausrüstung (Foto: Patrice Kunte)

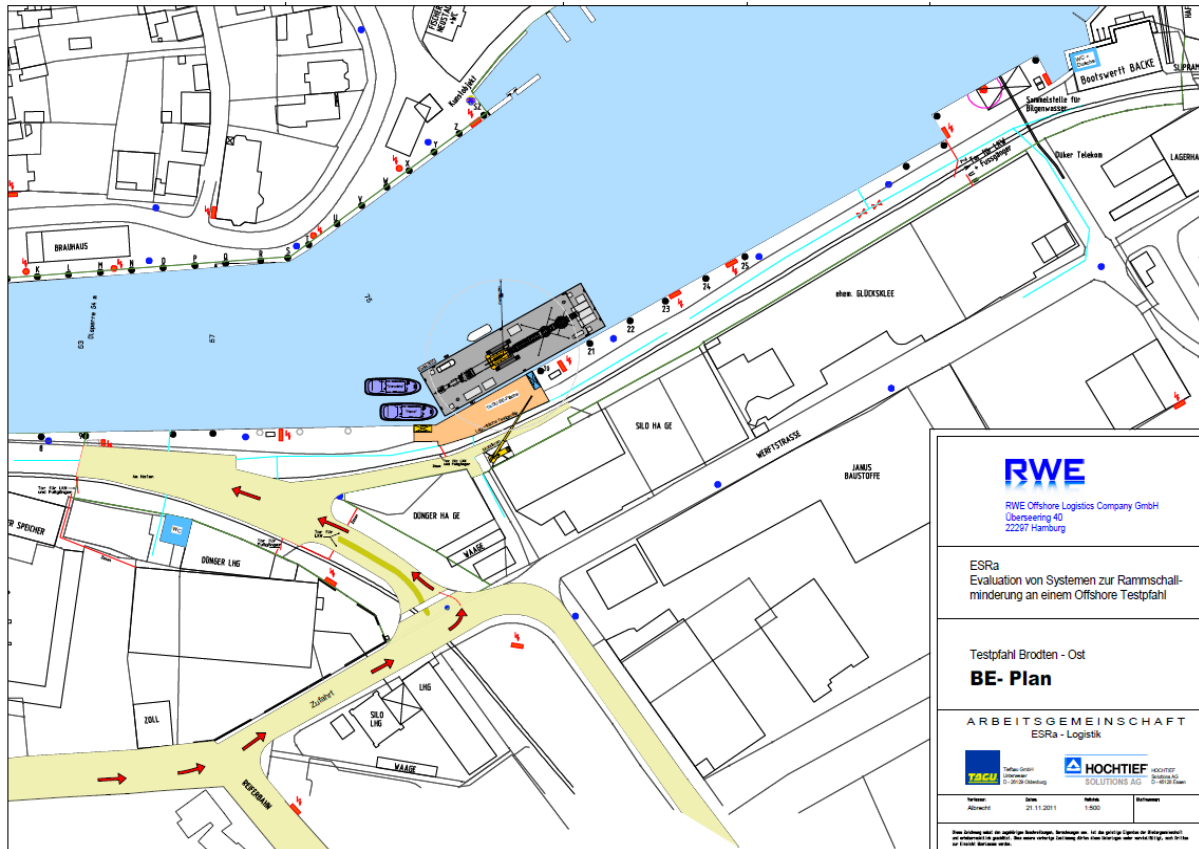


Abbildung 9: Liegeplatz Stelzenpontons im Basishafen Neustadt, Baustelleneinrichtungsplan [16]

5.3 Druckluftkompressor

Für die Versorgung der einzelnen Testsysteme wurde an Bord der Arbeitsplattform ein regelbarer, ölfreier Druckluftkompressor vom Typ CompAir C210TS-12 vorgehalten. Dieser hat bei einem maximalen Betriebsdruck von 12 bar eine austrittsfreie Luftversorgung von 21 m³/min (siehe auch Abbildung 10). Für den Betrieb des Schallminderungssystems der Firma Menck (vgl. Kapitel 6.1.2) wurde der Kompressor mit einem Regler versehen, um den Druck entsprechend dem Bedarf der Feuerwehrschläuche herunter regeln zu können.

Modell	C210TS-12 (Neue DLT2701 Elektronische Steuerung)
Hz	50
Serie	Serie C
Beschreibung	Fahrbare Kompressoren (Serie C Turboscrew - 16 bis 27 m³/min)
Gas komprimierter Austrittsfreie Luftversorgung bei Nenndruck (m ³ /min)	Luft 21
Minimaler Betriebsdruck (Bar g)	5
Maximaler oder Nennbetriebsdruck (Bar g)	12
Maximaler Betriebsdruck (Bar g)	12
Motorleistungsabgabe (kW)	180
Geräuschpegel	100(LWA) 71(LPA)
Länge (mm)	5195
Breite (mm)	1960
Höhe (mm)	2350
Druckluftauslässe (Zoll)	3 x 3/4" + 1 x 2"
Drehzahl ohne Last (U/min)	1000
Volllastdrehzahl (U/min)	2400
Ölinhalt (l)	65
Gewicht: Einstellbare Zugstange, gebremst (kg)	3310
Volumen Kraftstofftank (l)	370
Spurweite (mm)	1720
Bodenfreiheit (mm)	220
Reifengröße (mm)	205 R 14 C
Verdecklänge (mm)	3750
Motortyp	Cummins QSB6,7
Kühlsyste	Wassergekühlt
Bei Nennbetriebsdruck: 12 Bar g, Auslassfreie Luftversorgung = 21 m ³ /min	



Abbildung 10: Verwendeter Druckluftkompressor (Quelle: www.compair.de)

6. Schallminderungssysteme

Der Arbeitskreis „Schall“ des Betreiberforums der Offshore-Stiftung hatte im Vorfeld der Antragsstellung anhand der damals vorhandenen Untersuchungen und Forschungsberichte eine Auswahlmatrix aufgestellt, um die zur Verfügung stehenden Schallminderungsmethoden im Hinblick auf Schallminderungspotential und Installation bewerten zu können. Auf dieser Basis wurde die Auswahl der in ESRA getesteten System getroffen. Da sich einige der ausgeführten Systeme noch im Konzeptstatus befanden, wurde die Bewertung ihres Schallminderungspotentials anhand von theoretischen Berechnungen oder den Ergebnissen kleinmaßstäblicher Versuche getroffen.

Beim Vergleich von Messungen an verschiedenen Standorten sind grundsätzlich die Randbedingungen wie Wassertiefe, Bodenparameter und Rammgerät zu berücksichtigen. Rechnerische Verfahren zur Übertragung von Messergebnissen auf alternative Standorte oder die Normierung verschiedener Messungen sind derzeit kaum möglich. Um trotzdem eine Vergleichbarkeit mit zurückliegenden und zukünftigen Vorhaben zu schaffen, sollte parallel ein sogenanntes ‚Referenzsystem‘ mitgetestet werden. Dabei bot es sich an, auf ein Blasenschleier-System zurückzugreifen, dessen Wirkungsprinzip bzw. Dämpfungspotential bekannt war und das in der Vergangenheit bereits großmaßstäblich getestet wurde. Der Arbeitskreis „Schall“ wählte dafür folgendes System aus:

- Kleiner, gestufter und geführter Blasenschleier (auch: Little Bubble Curtain/LBC; Fa. Weyres)

Auf den Einsatz des großen Blasenschleiers wurde verzichtet. Im Nachgang ist dabei anzumerken, dass ein großer Blasenschleier, der aufgrund seines räumlichen Abstands vom Rammort einen größeren Teil des über den Meeresboden wieder eingebrachten Schalls einfängt, die Bewertung der Standortbedingungen am Brodtener Pfahl sicherlich vereinfacht hätte.

Im Rahmen des Projektes ESRA wurden somit die folgenden **fünf** unterschiedlichen Schallminderungssysteme (engl. Noise Mitigation System – NMS) von vier verschiedenen Herstellern verwendet:

1. Rohr mit innen liegendem Blasenschleier der Fa. IHC (IHC NMS)

2. Feuerwehrschlauchmethode der Fa. Menck (Menck FWS)
3. Kleiner gestufter Blasenschleier der Fa. Weyres (engl. Little Bubble Curtain – Weyres LBC)
4. Schalldämmschalen mit zwei Blasenschleiern (modular aufgebaut) der Fa Weyres (Weyres BeKa-Schale)
5. System 5: Hydro Sound Damper der TU Braunschweig (TUBS) und Dr. Herrn Elmer (TUBS/Elmer HSD)

Im Folgenden werden die verwendeten Schallminderungsmaßnahmen detailliert dargestellt. Die Beschreibungen stammen im Wesentlichen aus Zuarbeiten der Firmen IHC, Menck, Weyres und TU BS [17], [18], [19], [20], [21].

6.1.1. IHC Schallminderungsrohr („Noise Mitigation Screen“)

Bei dem Schallminderungssystem der Firma IHC Hydrohammer B.V. handelt es sich um ein zweischaliges Stahlrohr, bei dem zwischen Rohr und Rammpfahl ein geschützter Blasenschleier eingebracht wird. Das System wird über den Pfahl gestülpt und entfaltet seine Wirkung über die gesamte Länge der Wassersäule am Pfahl.

Bei einem Außen-Durchmesser von 3,65 m wiegt das IHC Rohr 30 t bei einer am Testpfahl vorhandenen Wassertiefe von 8,20 m und einer Gesamtlänge von 9 m. Bei einem Innendurchmesser des luftgefüllten, zweischaligen Systems von 3,10 m ergibt sich damit die Dicke der Impedanzschicht zu 275 mm. Die beiden 20 bzw. 15 mm starken Stahlbleche des Rohres sind an den Enden verschweißt. Bei neueren Systemen der Fa. IHC wurde diese Schallbrücke durch den Einbau von Kunststoffteilen beseitigt.

Innen angebrachte Führungsrollen (siehe Abbildung 11), ermöglichen eine einfache Handhabung beim Überstülpen über den Pfahl und halten das System in einen gleichmäßigen Abstand zum Pfahl (Abbildung 12).

Der Zwischenraum, vergleiche Abbildung 13, wird dann über Druckschläuche mit ca. 6 bar Luft bei einem Verbrauch von 3 m³/h versorgt. Die Luftblasen werden über ein Düsensystem auf mehreren Ebenen erzeugt. Das Düsensystem ermöglicht im Vergleich zum herkömmlichen Blasenschleier eine Verminderung von Kompressorleistung und -größe.

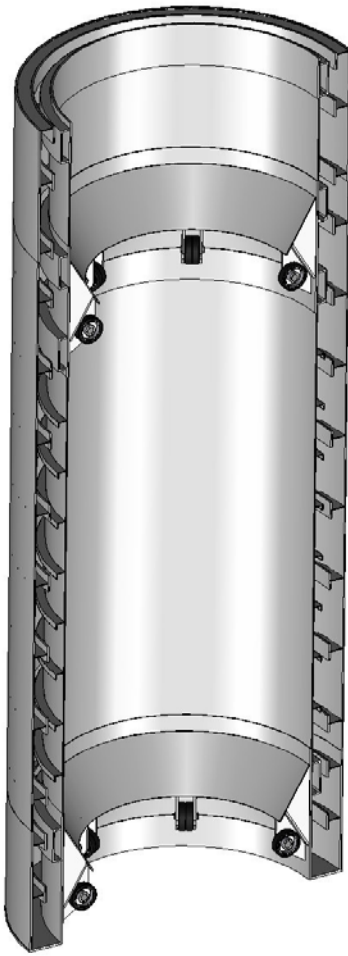


Abbildung 11: Noise Mitigation Screen der Fa. IHC, Schematischer Aufbau



Abbildung 12: IHC NMS bei der Installation (Foto: Patrice Kunte)



Abbildung 13: Blick in den Zwischenraum Pfahl/NMS während des Betriebs des Blasen-schleiers (Foto: Patrice Kunte)

6.1.2. „Feuerwehrschauchmethode“ der Fa. Menck

Im Rahmen des ESRa-Forschungsprojekts wurde ein Feuerwehrschauch-Schallschutzsystem von MENCK konzipiert, um die grundsätzliche Wirksamkeit und Handhabung derartiger Systeme in der praktischen Anwendung zu untersuchen. Die Verwendung von leichten Feuerwehrschräuchen ermöglicht grundsätzlich die Entwicklung relativ kleiner und kompakter Schallschutzsysteme, was für die wirtschaftliche Errichtung von OWEA eine große Rolle spielt.



Abbildung 14: *Menck Feuerwehrschauchsystem beim Abheben vom Deck der Arbeitsplattform (links) sowie bei der Installation am Pfahl (rechts) (Foto: Patrice Kunte)*

Das Testsystem besteht aus 222 versetzt angeordneten Feuerwehrschräuchen, die mit Schlauchschellen am Luftverteillerring (oben) und Ballastring (unten) befestigt sind (Abbildung 15). Am Luftverteillerring sind vier Auftriebskörper befestigt, die die Feuerwehrschräuche straff halten. Die Schläuche werden über den hohlen Luftverteillerring mit Druckluft versorgt. Der Relativdruck der Luft in den Schläuchen wird auf 1 bar eingestellt, um ein Zusammenfallen der Schläuche infolge des hydrostatischen Wasserdrucks zu vermeiden. Die Feuerwehrschräuche sind versetzt angeordnet, so dass die wirksame Dicke der schallisolierenden Luftwand vergrößert wird und größere Spalte vermieden werden. Konstruktionsbedingt bleibt ein kleiner Spalt zwischen

den Schläuchen, weil sie mit Schlauchschellen an entsprechenden Tüllen befestigt werden. Die äußere Schlauchreihe wurde leicht demontierbar ausgeführt, um die Wirkung von ein- und zweireihigen Schlauchlagen untersuchen zu können (aufgrund der begrenzten Zeit Offshore wurde bei ESRa auf einen einlagigen Test verzichtet).



Abbildung 15: *Detailaufnahme des unteren Endes des NMS mit den Anschlüssen der Feuerwehrschräuche (Foto: Patrice Kunte)*

Das Gesamtsystem besteht aus zwei Hälften, die sich leicht auf einem LKW transportieren lassen. Die Abmessungen sind so gewählt, dass die beiden Hälften auch in einen 40"-open top-Container passen. Unter dem Ballastring ist eine Bodenplatte montiert, um die zusammengelegten Schläuche besser handhaben zu können. Die Bodenplatte verbleibt während des Einsatzes an Deck.

Das Seafastening des Feuerwehrschräuch-Schallschutzsystems erfolgt gemäß durch Abspannen der Hebeaugen des oberen Rings sowie durch Fixierung des unteren Rings an der Bodenplatte. Der untere Ring ist innen und außen mit Spannelementen an der Bodenplatte befestigt. Die Bodenplatte ist an Deck angeschweißt. Der obere Ring ist zudem fest mit dem unteren Ring des Feuerwehrschräuch-Schallschutzsystems verschraubt.



Abbildung 16: Seafastening des Feuerwehrschauch-Systems (Foto: Patrice Kunte)

Die Handhabung für den Einsatz des Feuerwehrschauch-Schallschutzsystems ist grundsätzlich einfach: Die Schrauben zwischen Ober- und Unterteil werden gelöst und die Spannelemente zwischen dem unterem Ring und der Bodenplatte sowie die Verzurrgurte werden zur Einsatzvorbereitung entfernt. Das System kann dann für die Installation und den Betrieb vertikal auseinandergezogen und von der Bodenplatte zur Installation am Pfahl gehoben werden. Beim eingesetzten Testsystem wurden vor der Installation die Luftgefüllten Schläuche mit spiralförmig verlaufenden Seilen zusammengehalten, damit ein - durch Strömung und Wellen verursachtes - Auseinanderziehen des Schlauchmantels verhindert wird. Die Schläuche wurden vor dem Hebevorgang mit geringem Luftdruck beaufschlagt, um die Seilspannung stabil einzustellen.

Nach dem Einsatz wird vor dem Zurückheben an Deck der natürliche Umgebungsdruck des Wassers genutzt, um die Luft aus den Schläuchen zu drücken. So wird durch einfaches Entlüften der Schläuche ein minimales Schlauchvolumen erreicht, welches analog zu der Situation vor dem Einsatz entsprechend geringen Stauraum im Innern des Systems benötigt. Beim Ablegen des Feuerwehrschauch-Schallschutzsystems werden die Schläuche mit einer Schlaufe zusammengezogen, um ein optimales Zusammenlegen zu gewährleisten.

Die Hauptabmessungen (Länge x Breite x Höhe) sind ca.:

- Schläuche zusammengefaltet: 4,9 m x 4,9 m x 2,0 m
- Schläuche ausgefaltet: 4,9 m x 4,9 m x 8,9 m

Das Gesamtgewicht beträgt ca. 20 t. Weitere Details können der folgenden Abbildung entnommen werden.

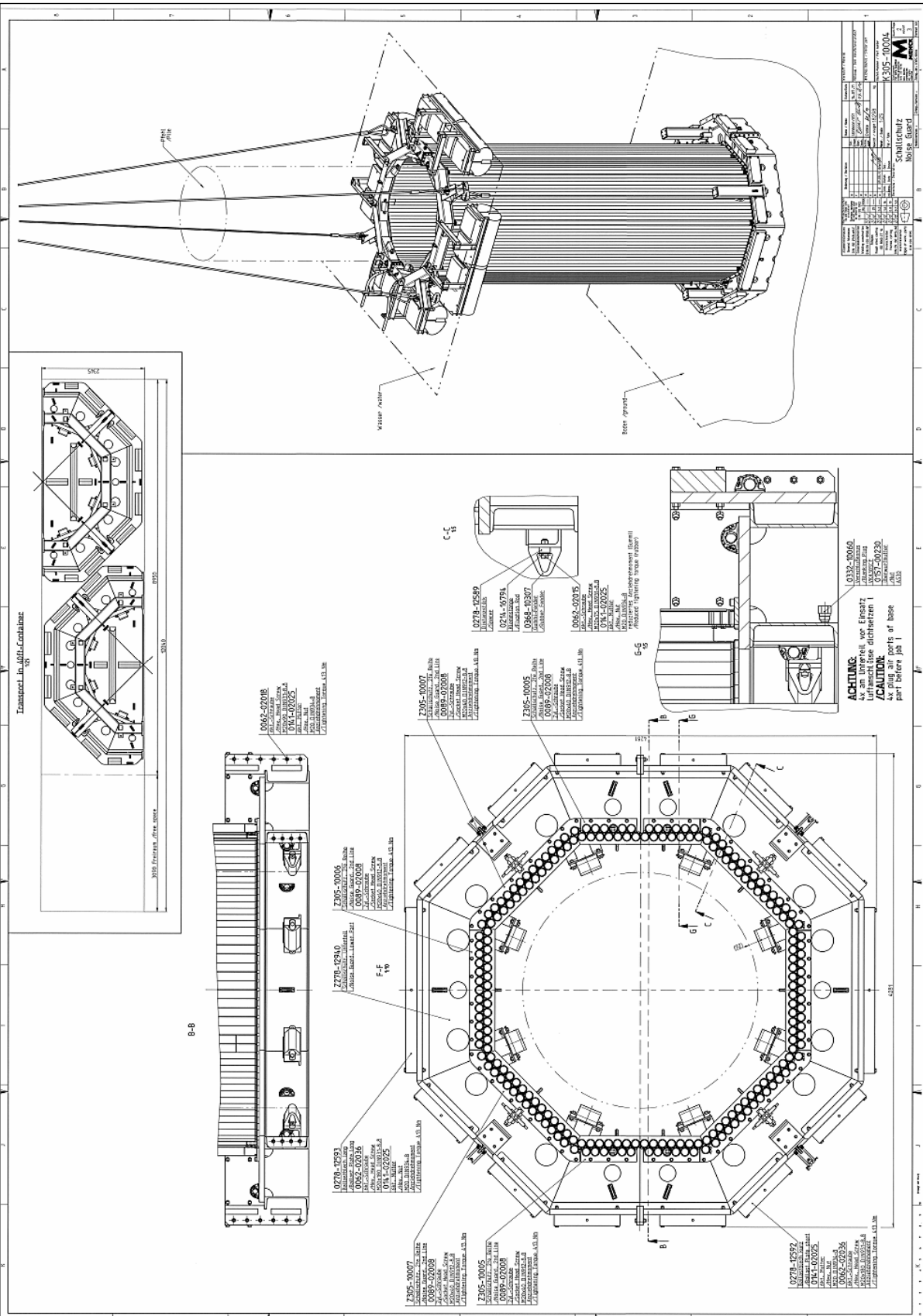


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Bauteile des Feuerwehrschauch-Systems

6.1.3. Little Bubble Curtain Weyres

Bei dem Little Bubble Curtain (LBC) der Fa. Weyres handelt es sich um einen gestuften und geführten kleinen Blasenschleier, d. h. dass in unterschiedlichen Wassertiefen Luftblasen ins Wasser eingetragen werden und zusätzlich Leitbleche um das gesamte System angebracht sind, um ein Abdriften der Luftblasen durch die Wasserströmung zu verhindern. In der Grundfläche ist das System ein Oktagon, der größte Durchmesser beträgt 5,25 m.

Das gesamte System ist so konzipiert, dass sich die einzelnen Stufen teleskopisch ineinander stapeln lassen, um eine möglichst platzsparende Konstruktion für Transportzwecke gewährleisten zu können (Abbildung 18). Die Zentrierung des System auf dem Pfahl erfolgt über eine Öffnung in der Bodenwanne und eine entsprechende, aufgehende Zentriereinheit (Abbildung 18 rechts). Die oberen beiden Ausblaseebenen mit ihren Leitblechen sind schwimmfähig ausgeführt, sodass sich das System nach Absetzen der Bodenwanne automatisch auf die entsprechende Wassertiefe anpasst.



Abbildung 18: *Eingefahrenes und teleskopisch ausgefahrenes LBC-System (Foto links: Patrice Kunte, Foto rechts: Weyres)*

Neben den in der folgenden Abbildung dargestellten Ringleitungen mit Auslassöffnungen befinden sich fünf weitere Ringleitungen im Bereich der beiden schwimmenden, mit Leitblechen versehenen Ausblaseebenen (Abbildung 18 rechts).

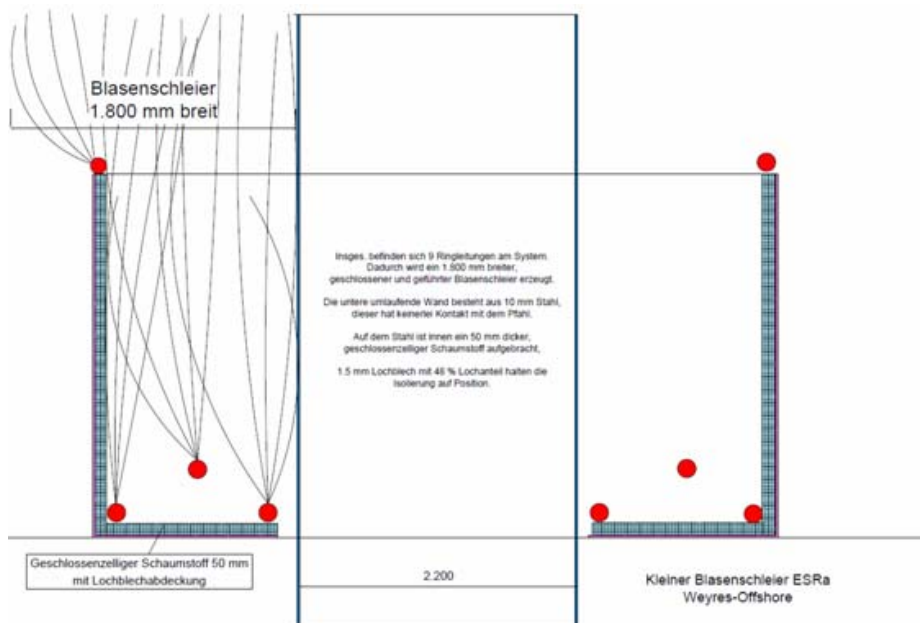


Abbildung 19: *Blasenschleier generierende Ringleitungen im Bereich der Bodenwanne, die mit 50 mm Schaumstoff ausgekleidet ist (Quelle: Weyres)*

Das installierte System im Betrieb kann der folgenden Abbildung entnommen werden.



Abbildung 20: *Kleiner gestufter Blasenschleier-LBC der Fa. Weyres im Einsatz (Foto: Patrice Kunte)*

6.1.4. BeKa-Schale Weyres

Bei den BeKa-Schalen der Firma Weyres handelt es sich um mehrlagige Schalldämmschalen (Abbildung 21), die über eine außenliegende Rahmenkonstruktion ausgesteift und gehalten wird. Die Abmessungen betragen 4,0 x 4,0 m im Grundriss bei 9 m Länge. Das Gesamtgewicht dieses schwersten getesteten Systems beträgt 39,8 to.

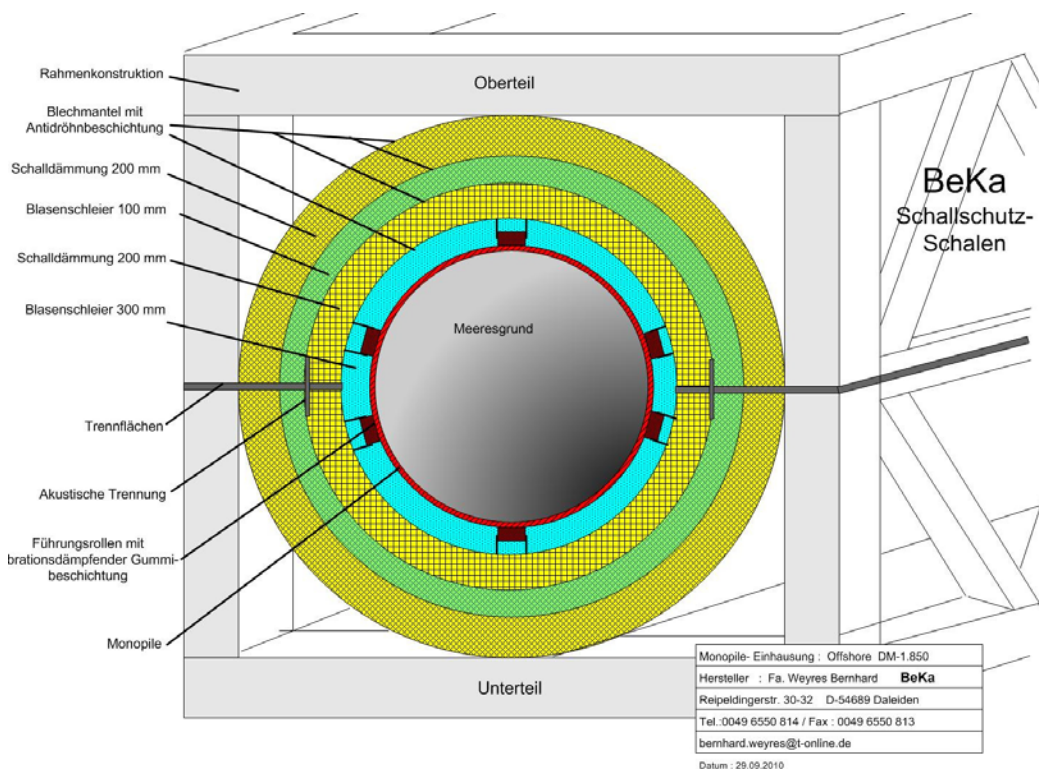


Abbildung 21: BeKa-Schale Fa. Weyres, schematische Konstruktionszeichnung

Der dargestellte Aufbau besteht aus fünf Positionen:

- Pos. 1 300 mm Blasenschleier unmittelbar am MP
- Pos. 2 20 mm vollflächige Auskleidung aus reflektionsarmen Gummi
- Pos. 3 200 mm Doppel-Stahlmantel mit Schalldämmfüllung (spez. Gewicht ca. 400-600 kg/m³)
- Pos. 4 150 mm Blasenschleier mit akustischer Entkoppelung zwischen Pos. 3 und Pos. 5 durch Industrie – Schwingungsdämpfer

- Pos. 5 200 mm Doppel-Stahlmantel mit Schalldämmfüllung (spez. Gewicht ca. 600-800 kg/m³)

Um den Rammpfahl befindet sich ein ca. 300 mm breiter von der Strömung unabhängiger erster Blaseschleier, Pos.1. Die Blasen werden durch geräuscharme Einblasdüsen in verschiedenen Ebenen erzeugt. Im Fußbereich wird der Pfahl durch eine enganliegende Gummimanschette umschlossen, um beim Betreiben des Blaseschleiers keine Sogwirkung nach dem Venturi-Prinzip zu erzeugen, also kein Schlamm eintrag. Die Stoßschallwellen, welche durch die Hammerschläge entstehen, werden durch den Blaseschleier, Pos. 1 gemindert und gelangen danach auf die vollflächige 20 mm dicke Gummibeschichtung, Pos. 2. Nachfolgend treffen die geminderten Schallwellen auf die 200 mm dicke erste Schallschutzkonstruktion, Pos. 3. Diese beinhaltet ein Material besonderer Mischung, welches bei Versuchen zu einem optimalen Messergebnis geführt hat. Das spezifische Gewicht beträgt ca. 400-600 kg/m³. Als nächste Maßnahme ist ein zweiter Blaseschleier eingebaut, Pos. 4, jeweils auch mit Lufteintrag durch geräuscharme Düsen in verschiedenen Ebenen. Zur Druckluftherzeugung wird nur ein Kompressor benötigt. Die 5. Schallschutzmaßnahme aus einer zweiten Schallschutzkonstruktion (Aufbau wie Pos. 3.) Die beiden Schallschutzkonstruktionen, Pos. 3 und 5 sind durch Industrie-Schwingungsdämpfer akustisch völlig voneinander getrennt. Es können keine Schwingungen nach außen übertragen werden. Zusätzlich befindet sich im Fußbereich ein Schallschutz, der je nach Bodenbeschaffenheit in den Meeresgrund eindringt. Auch dieser ist bei Bedarf auswechselbar. Das BeKa-System wird als Baukasten angeboten. Dadurch können Wassertiefen von 5 – 45 m ausgeglichen werden. Bei einem Monopile von 6.500 mm Durchmesser und einer Wassertiefe ca. 30 m soll das Gesamtgewicht max. 180 Tonnen betragen.

Das BeKa-System ist aus zwei Halbschalen aufgebaut. Dies erleichtert zum einen den Transport. Zum anderen lässt sich bei ausreichender Krankapazität ein Pfahl in die untere Schale einlegen. Nach dem „Schließen“ des Systems über die obere Halbschale kann dann das Gesamtsystem Pfahl–Beka-Schale eingehoben werden. Eine entsprechende Fixierung der Beka-Schale am Pfahl über Knaggen oder Ähnlichem sowie des Gesamtsystems am Installationsschiff vor dem Rammstart wird dabei vorausgesetzt.



Abbildung 22: Zweiteiliger Aufbau der BeKa-Schale Fa. Weyres (Foto: Patrice Kunte)



Abbildung 23: BeKa-Schale bei der Installation (Foto: Patrice Kunte)

6.1.5. Hydro Sound Damper TU Braunschweig/Dr. Elmer

Das Prinzip der Hydroschalldämpfer

Luft ist das ideale Medium zur Dämmung und Minderung von Hydroschall – nicht Stahl. Das neuartige, patentierte Verfahren der Hydroschalldämpfer (HSD) benutzt daher lediglich luftgefüllte, kleine HSD-Ballons und HSD-Foam Elemente zur wirksamen Minderung des Hydroschalls bei Offshore-Rammarbeiten. Die HSD-Elemente werden an einem engmaschigen Netz befestigt, das flexibel um die Schallquelle im Wasser aufgespannt werden kann. Stahl wird nach Abbildung 24 lediglich für die Gewichte am Meeresboden eingesetzt sowie für Unterkonstruktionen oberhalb des Wasserspiegels.

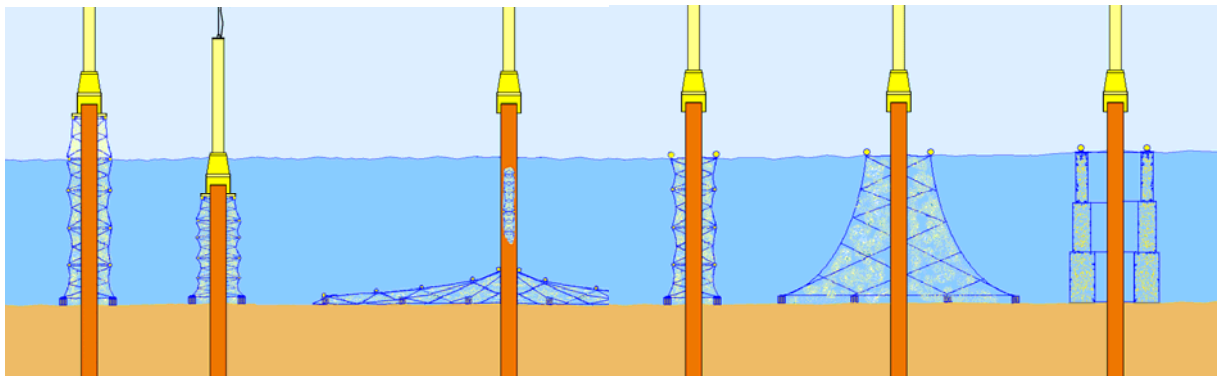


Abbildung 24: Anwendungsbeispiele und Varianten von Netzen mit Hydroschalldämpfern
(Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)

Damit ist von vornherein eine optimale, kostengünstige und hocheffiziente Materialnutzung des Verfahrens gegeben, mit geringem Gewicht, flexibel in der Anwendung und nur geringem Aufwand für die Herstellung, den Transport und in der praktischen Anwendung.

Abbildung 24 zeigt unterschiedliche Varianten für den Einsatz von HSD-Netzen. Die Netze werden mit Winden herabgelassen und können unabhängig vom Pfahl an Schwimmkörpern, oder an der Ramme bzw. an der Rammführung befestigt werden und ermöglichen es auf einfache Weise, große Bereiche des Meeresbodens abzudecken, um auch den indirekten Schalleintrag über den Boden zu reduzieren. HSD-Netze können ebenfalls auch über starre Fachwerk-Konstruktionen gespannt werden oder lassen sich auch in großer Entfernung und losgelöst vom Rammpfahl realisieren.

Im Prinzip stellen die Hydroschalldämpfer eine gezielte technische Weiterentwicklung und Anwendungsoptimierung natürlicher Luftblasen im Wasser dar.

Luftblasen im Wasser wirken schallmindernd durch Streuung und Absorption von Hydroschallwellen. Insbesondere im Bereich der Eigenfrequenz der Blasen ist die schallmindernde Wirkung der Blasen außerordentlich hoch, setzt aber voraus, dass diese Blasen kontrollierbar und in ihrer Eigenfrequenz einstellbar sind. Das ist aber bei natürlichen Luftblasen nicht gegeben.

Während es bei natürlichen Luftblasen im Wasser eine nicht beeinflussbare, weitgehend konstante, umgekehrt proportionale Beziehung zwischen dem Durchmesser und der Eigenfrequenz einer Luftblase gibt, kann die Eigenfrequenz von HSD-Ballons, auch unabhängig von der Größe, durch den Innendruck, die Steifigkeit und die Dicke der einhüllenden Membran eingestellt werden. Schon allein durch die Größe können HSD-Elemente optimal auf den Frequenzbereich der Hydroschallwellen abgestimmt werden und durch die Interaktion mit dem umgebenden Wasser sehr hohe Schallminderungswirkungen erzielen.

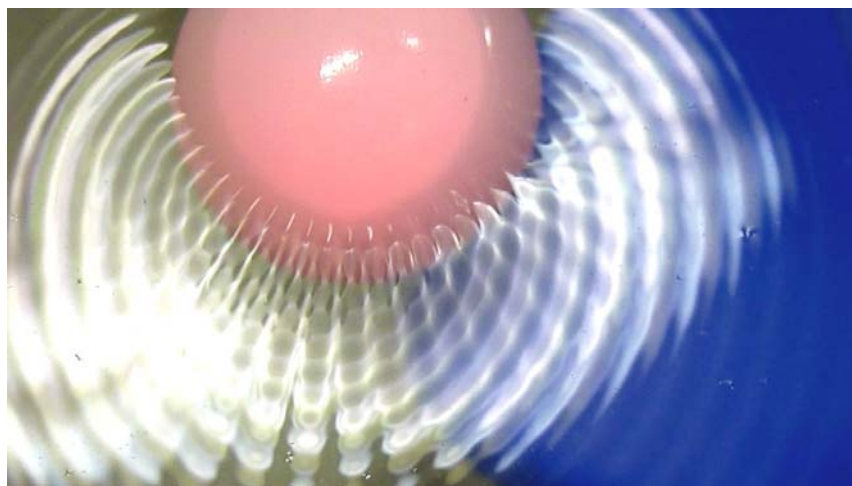


Abbildung 25: *Interaktion eines HSD-Ballons zur Streuung und Abstrahlung von Schallwellen (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)*

Eine weitere Möglichkeit stellen die robusten HSD-Foam Elemente dar. Sie werden über ihre Größe und das Material abgestimmt. Alle für die schallmindernde Wirkung entscheidenden Eigenschaften der HSD-Elemente wie: Eigenfrequenz, Form, Größe, Position, Anzahl, Abstände und Dämpfung sind damit exakt auf die Eigenschaften und das Spektrum einer Schallquelle einstellbar. Die erforderliche Volumen-Konzentration der HSD-Elemente liegt etwa bei 0,1 % bis etwa 1 %, lokal und in tieferen Schichten

auch darüber. Bei den geringen Volumenkonzentrationen sind die vertikalen Auftriebskräfte der HSD-Elemente sowie horizontale Kräfte aus Gezeitenströmungen noch gering und problemlos aufzunehmen, da die HSD-Netze für Meeresströmungen durchlässig sind.

Ein großer Vorteil im Offshore-Einsatz ist, dass die Hydroschalldämpfer keine Druckluftversorgung benötigen.

Das HSD-Testsystem für die ERSa-Untersuchungen

Numerische Simulationen und messtechnische Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits bei den geringen Volumenkonzentrationen Schallminderungen von etwa 20-30 dB im Bereich der jeweiligen Eigenfrequenz der HSD-Elemente bis hin zur 3 bis 5-fachen Frequenz erreicht werden. In der Praxis kann somit das gesamte Frequenzspektrum von 50 bis 10.000 Hz mit etwa 5-7 unterschiedlichen Elementgrößen abgedeckt werden.

Bei den Offshore-Tests im Rahmen des Forschungsprojektes ERSa war es daher von besonderem Interesse, genauere Aussagen und Ergebnisse über den wirksamen Frequenzbereich von HSD-Elementen gleicher Größe bzw. gleicher Eigenfrequenz bei einer Offshore-Rammung zu erhalten.

Aus diesem Grund sind bei den ERSa-Tests grundsätzlich alle eingesetzten HSD-Elemente auf dieselbe Eigenfrequenz von etwa 120 Hz abgestimmt worden. Damit wurden wirksame Schallminderungen vor allem im Frequenzbereich von etwa 100 bis 500 Hz erwartet. Dieser Frequenzbereich stellt den pegelbestimmenden Frequenzbereich im abgestrahlten Hydroschall bei Offshore-Rammungen dar. Nach den Ergebnissen von theoretischen und messtechnischen Untersuchungen sind unterhalb von 100 Hz nur geringe Schallminderungen zu erwarten während diese oberhalb von etwa 500 Hz langsam abnehmen.

Der Aufbau und die Funktionsweise eines HSD-Testsystems ist in Abbildung 26 dargestellt. Das gesamte HSD-Netz ist in einer schwimmenden ringförmigen Konstruktion einschließlich der erforderlichen Gewichte untergebracht und wird durch Winden herabgelassen.

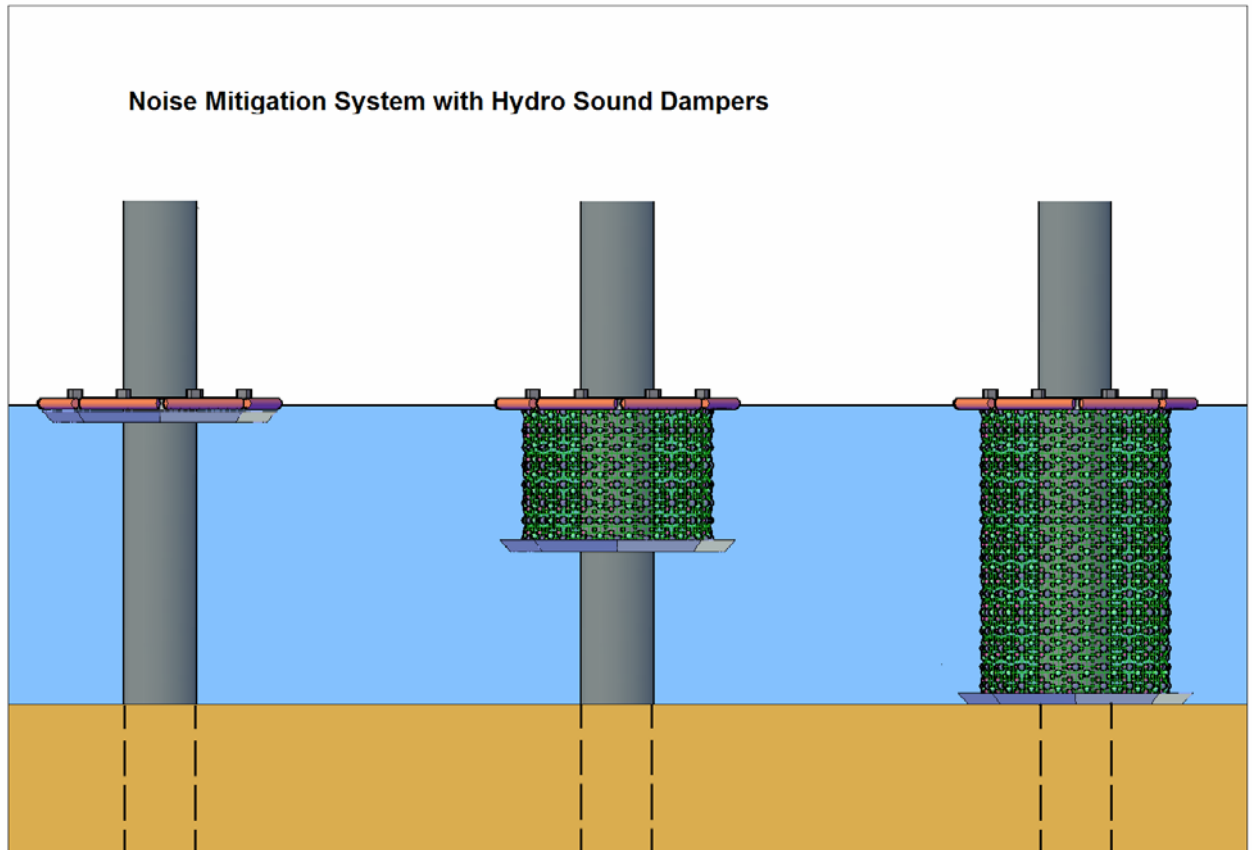


Abbildung 26: HSD-Testsystem mit einem Netz (eingefahren, halb- und voll abgelassen)
(Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)

Um im Rahmen der ESRa-Messungen unterschiedliche HSD-Netze untersuchen zu können, ist eine spezielle Test-Konstruktion zur gleichzeitigen Untersuchung von 3 unterschiedlichen HSD-Netzen entwickelt worden.

Aufbau und Einsatz der ESRa HSD-Konstruktion

Für den Test des HSD-Systems beim Projekt ESRa wurde vom HSD-Team die eingesetzte Konstruktion geplant, gebaut und bei der Durchführung der Tests betreut. Hierbei waren folgende Punkte maßgebend:

- Wirtschaftlichkeit
- einmaliger Einsatz, bezogen auf die Begebenheiten des Brodtener Pfahls
- Testmöglichkeit von drei unterschiedlichen HSD-Netzen und ihrer Kombinationen

Das Ziel der Tests bei diesem Projekt lag in der Überprüfung der Wirkungsweise dreier mit unterschiedlichen HSD-Elementen bestückten Netzen. Alle drei Netze hatten eine Maschenweite von 2,0 x 2,0 cm mit einer Garnstärke von 1,2 mm. Alle HSD-Elemente wurden im Abstand von 20 x 20 cm befestigt. Zum Herablassen dieser drei Netze wurde eine Konstruktion gebaut, die stabil und sicher die Winden zum Herablassen aufnehmen und selbstschwimmend sein sollte. Selbstschwimmend deshalb, weil nach der Platzierung durch den Mobilkran dieser den Haken lösen muss, um den Hammer aufsetzen zu können. Während dieser Zeit muss die Konstruktion (Plattform) das Eigengewicht, sowie die an den unteren Netzrändern hängenden Schwergewichte, sicher tragen. Dieses wurde durch den Bau von ausreichend dimensionierten Schwimmkörpern sichergestellt. Bild 3 zeigt die Konstruktionszeichnung der gebauten Plattform. Auf der Plattform wurden für jedes der drei Netze vier händisch zu betätigende Seilwinden vorgesehen, die als Doppelseilwinden ausgestattet, über Umlenkrollen die Schwergewichtsringe über dann acht gleichmäßig verteilte Stahlseile hielten. So konnte jedes Netz einzeln oder in Kombination auf den Meeresboden herabgelassen und wieder heraufgezogen werden. Es sei angemerkt, dass dieses Verfahren nur für dieses Forschungsvorhaben realisiert wurde. Für zukünftige Offshore-Einsätze werden automatische, hydraulische Seilwinden verwendet, die nur ein einzelnes Netz herablassen.

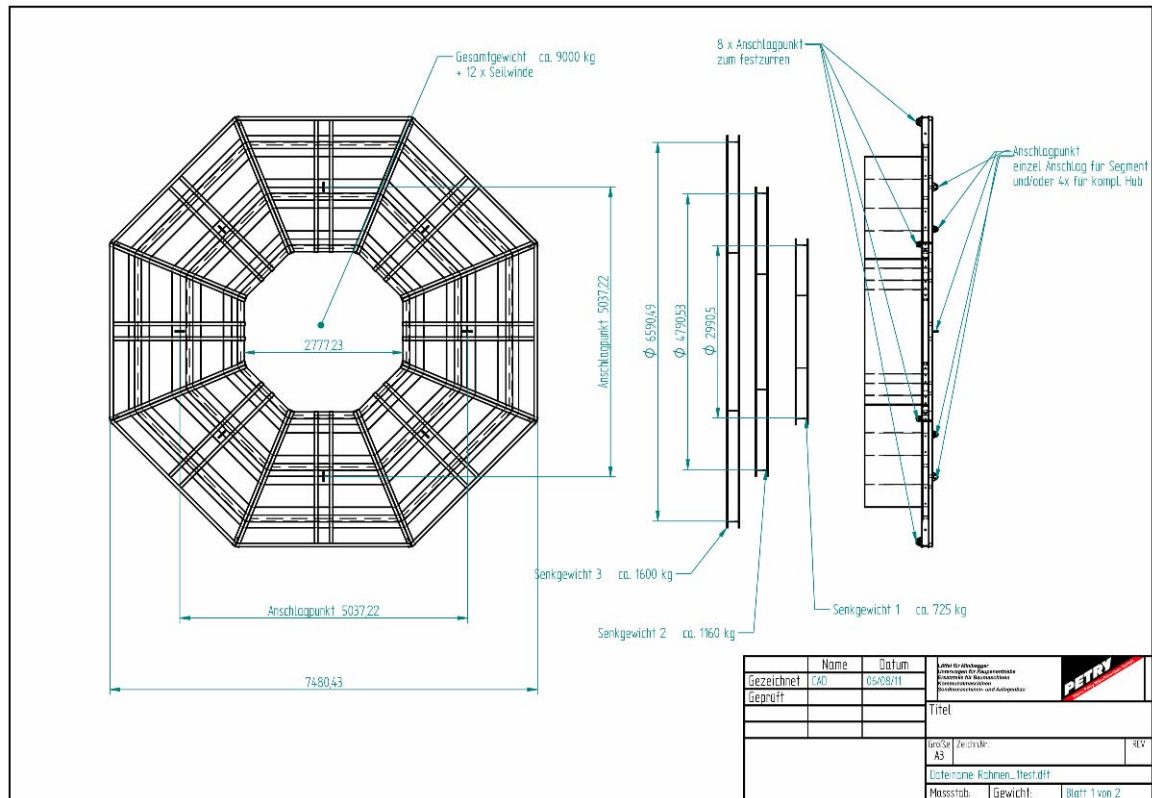


Abbildung 27: Konstruktionszeichnung der ESRa HSD-Plattform (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)

Die drei Netze und ihre Bestückung können folgendermaßen beschrieben werden:

– Netz 1 (inneres Netz)

Das innere Netz (Durchmesser 2,90 m) wurde mit doppellagigen luftgefüllten HSD-Ballons bestückt.



Abbildung 28: Fertigung des inneren Netzes mit doppellagigen luftgefüllten HSD-Ballons (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)

– Netz 2 (mittleres Netz)

Das mittlere Netz (Durchmesser 4,80 m) wurde mit robusten HSD-Foam-Elementen bestückt.

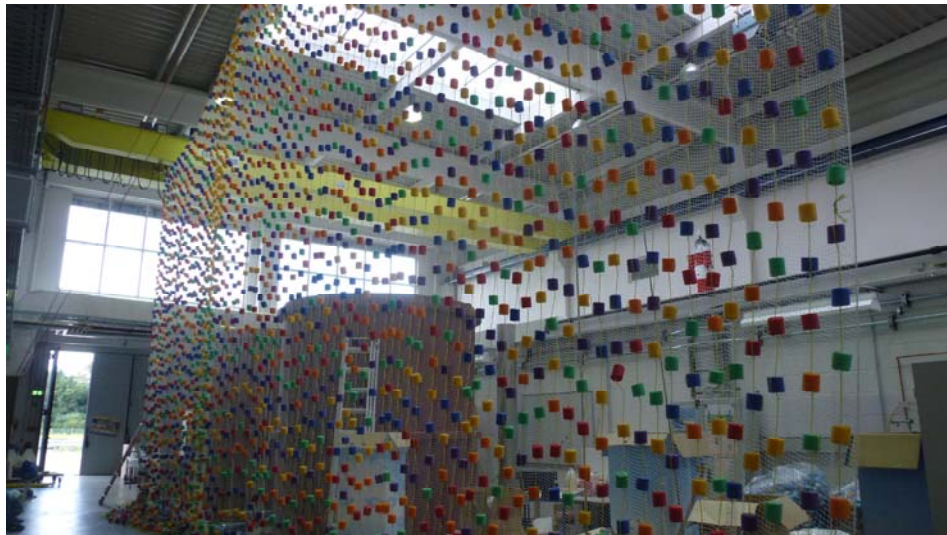


Abbildung 29: *Fertigung des mittleren Netzes mit HSD-Foam-Elementen (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)*

– Netz 3 (äußeres Netz)

Das äußere Netz (Durchmesser 6,60 m) wurde mit einlagigen luftgefüllten HSD-Ballons bestückt.

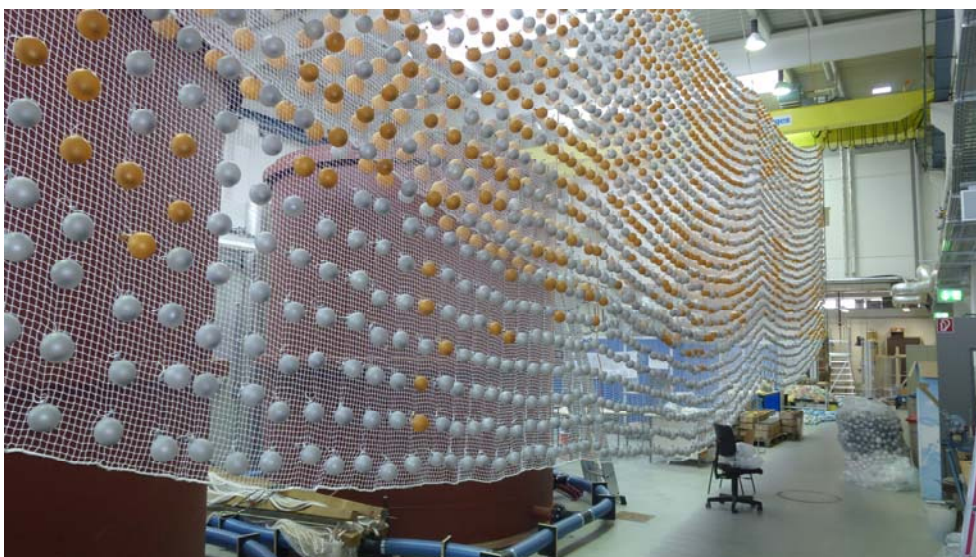


Abbildung 30: *Fertigung des äußeren Netzes mit einlagigen HSD-Ballons (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)*



Abbildung 31: Die gesamte HSD-Plattform über dem Testpfahl (Foto: Patrice Kunte)



Abbildung 32: Herablassen des inneren Netzes durch wissenschaftliche Muskelkraft (Foto: Patrice Kunte)

6.1.6. Gewichtsvergleich der Systeme

Aufgrund der speziellen Rand- und Umweltbedingungen am Brodtener Pfahl ist eine detaillierte Aussage über die Einbindung der Systeme in die Logistik eines Offshore-Windparks in tieferem Wasser nur schwer möglich. Eine Betrachtung der Systemgewichte liefert jedoch einen ersten Hinweis. Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung der Gewichte der Testsysteme von ESRA. Die Spalte 4 enthält zudem einen Vergleich des jeweiligen Gewichtes mit einem 9 m langen Abschnitt des Rammpfahles (dies entspricht im Mittel der Länge der Testgeräte). Für die Geräte mit Auftriebskörper 2, 3, 5 muss man hierbei anführen, dass ein großer Teil ihres Gewichtes auf den Ballasting und die Schwimmkörper entfällt. Dies bedeutet, dass bei einer Skalierung der Systeme auf tieferes Wasser das Systemgewicht nur unterproportional ansteigen wird. Vor diesem Hintergrund zeichnen sich somit insbesondere der LBC und die HSD durch geringeres Gewicht und damit einfache Handhabbarkeit aus.

Für die ‚rohrartigen‘ Systeme 1+4 zeigt sich jedoch, dass die Gewichte deutlich über dem Gewicht des zu umhüllenden Pfahlabschnittes liegen. Dies führt bei einer Skalierung auf einen realen Windpark zu Systemabmessungen und -gewichten, die z.B. im Falle einer Monopilestruktur die des Rammpfahles erreichen können. Solche Systeme können nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn Installationsgeräte mit genügend Platz an Deck und ausreichend Nutzlast zur Verfügung stehen.

Nr.	System	Gewicht [to]	% des Pfahlgewichtes (bezogen auf 9 m Länge)
1	IHC NMS	29.4	127
2	Menck	20	86
3	Weyres LBC	7.4	32
4	Weyres BeKa	39.8	172
5	TU BS HSD	10	43

Tabelle 3: Gewichte der Testsysteme und Vergleich mit einem 9 m Abschnitt des Testpfahles

7. Durchführung der Hydroschall- und Erschütterungsmessungen

7.1 Versuchsaufbau und Messkonzept

Ein Testpfahl der Menck GmbH wurde als Rammpfahl benutzt (siehe Kapitel 4). Die Daten des Pfahls sind noch einmal in Tabelle 4 zusammengefasst. Es befand sich kein größerer Bewuchs aus Muscheln oder Tang am Testpfahl, wie eine vorige Besichtigung ergab.

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 33 schematisch dargestellt. Über den Rammpfahl wurden verschiedene Schallminderungssysteme gestülpt. Der Hammer besaß eine maximale Schlagenergie von rund 300 kJ. Der Hammer, die jeweiligen Schallminderungssysteme, sowie der notwendige Kran und Zubehör (z. B. Kompressor für Druckluft) befanden sich an Bord eines Stelzenpontons, Abbildung 33. Dieser wurde mittels zweier Schlepper jeden Tag, bis auf den 22. August 2011, auf eine definierte Position vor den Ponton gebracht. Aufgrund der täglichen An- und Abfahrt des Pontons ergaben sich kleinere Abweichungen der exakten Position des Arbeitspontons.

Die Unterwasserschallmessungen wurden an fünf verschiedenen Messpositionen um den Testpfahl durchgeführt, Abbildung 36 und Tabelle 6. Dabei wurden zum größten Teil (vier Messpositionen) autonome abgesetzte Messsysteme verwendet (Abbildung 34). Zusätzlich wurde ein Array bestehend aus vier Hydrophonen und einem Geophon verwendet, Abbildung 35.

Position	N 53 59.877' E 10 54.489'
Durchmesser	2,2 m
Höhe über der Wasserlinie	5,5 m
Wassertiefe	8,5 m
Länge im Meeresboden	ca. 65,0 m
Wandstärke	50,0 mm

Tabelle 4: Daten des Testpfahls

Die abgesetzten Messsysteme besaßen jeweils zwei Hydrophone (Unterwassermikrofone), die mit jeweils einem Auftriebskörper in etwa 1,8 m und 3,6 m Höhe über dem Meeresboden (Sediment) positioniert wurden. Die Messelektronik befand sich in einem Stahlgehäuse, das gleichzeitig auch als Gewichtsanker diente. Zusätzlich wurde an dem Stahlgehäuse ein Seil inkl. Ankerkette und Anker zur Fixierung am Meeresboden verwendet. Zur Markierung der Messposition wurde über ein Seil eine Markierungsboje gesetzt, Abbildung 33. Diese Messsysteme befanden sich in 375 m bis 750 m Entfernung zum Testpfahl.

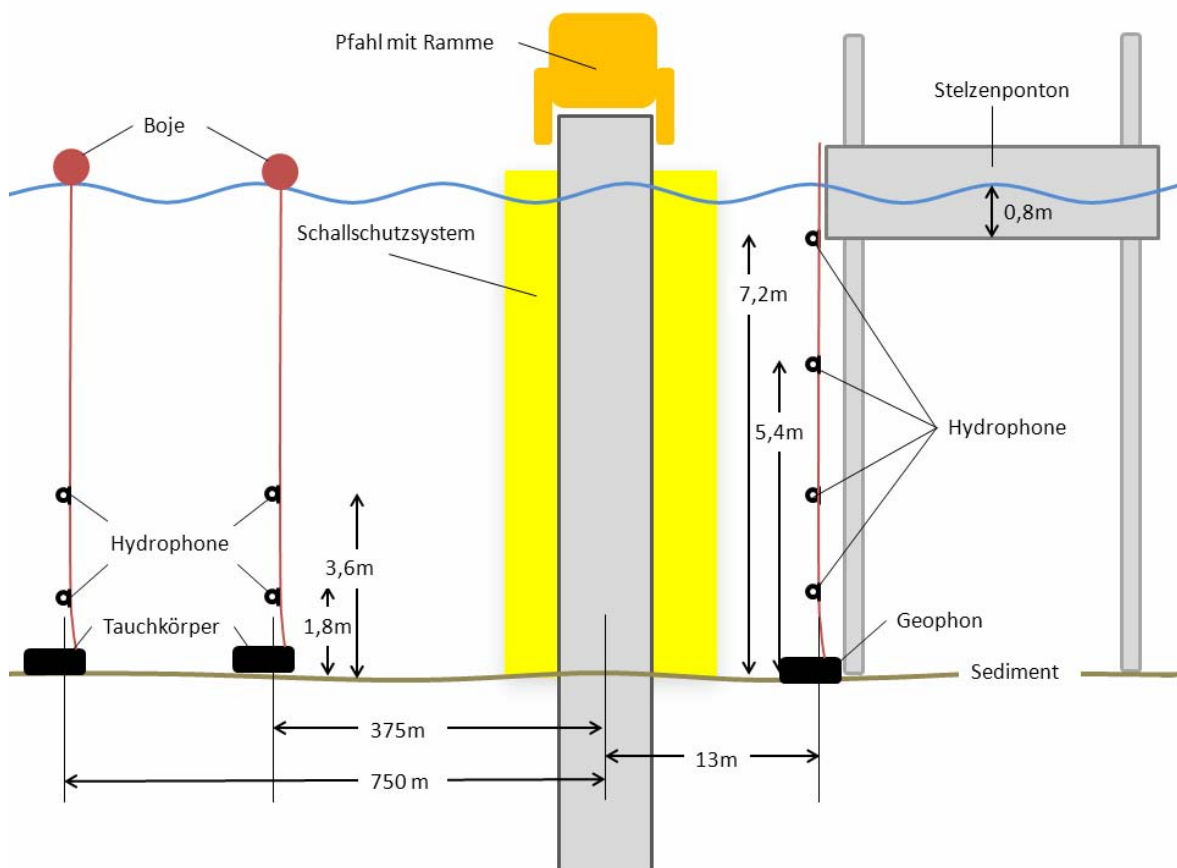


Abbildung 33: Schematischer Versuchsaufbau (unmaßstäblich)

Zusätzlich wurde ein Hydrophon-Array inkl. eines Geophons am Arbeitsponton im Nahfeld installiert. Dieses System bestand aus einem Stahlgehäuse, in dem ein axiales Geophon (vertikale Ausrichtung) positioniert war. Dieses Gehäuse diente ebenfalls als Gewichtsanker. Über ein mit Blei gefülltes Seil wurden vier Hydrophone in unterschiedlichem Abstand zum Meeresboden befestigt. Die Messelektronik befand sich an Bord des Arbeitspontons, Abbildung 35.

Bei allen Messsystemen wurden die Zeitsignale („Tonbandaufnahmen“) der Unterwassergeräusche (Hydroschall bzw. Schwinggeschwindigkeit der Erschütterung) aufgezeichnet, die später an Land ausgewertet wurden.

Zusätzlich zu den Unterwasserschallmessungen wurden jeden Tag Messungen der Schallgeschwindigkeit, der Wassertemperatur und des Salzgehaltes mithilfe einer CTD Sonde vom Arbeitsponton durchgeführt.

In der Tabelle 5 sind sämtliche eingesetzte Messsysteme zusammengefasst. In der Abbildung 36 sind die geographischen Lagen der verwendeten fünf Messpositionen dargestellt. In der Tabelle 6 sind die dazugehörigen geographischen Koordinaten der Messpositionen zusammengefasst.

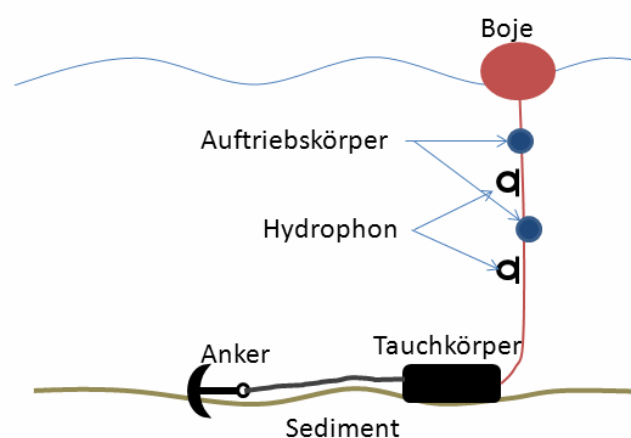
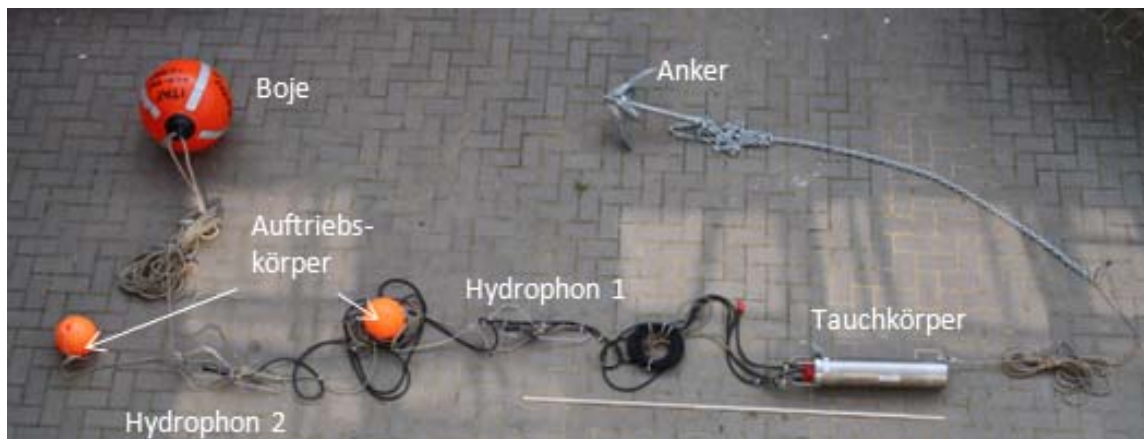


Abbildung 34: Autonome abgesetzte Messsysteme der itap GmbH für Unterwasserschallmessungen an den Messpositionen MP1 bis MP4. oben: Foto; unten: schematische Skizze

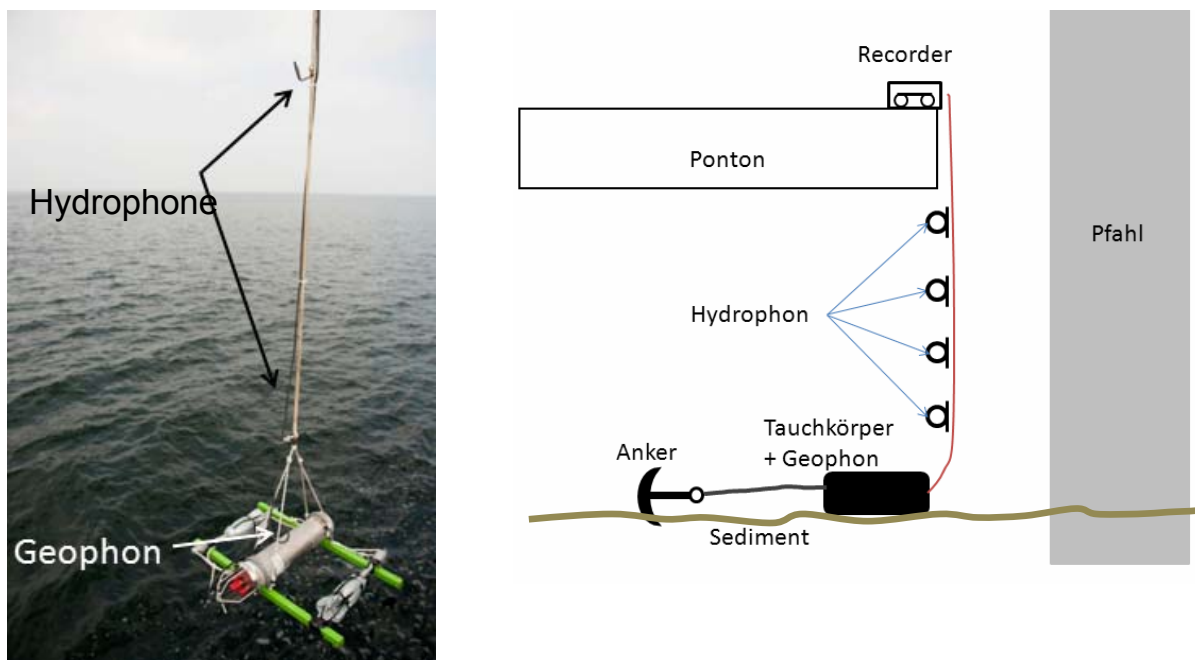


Abbildung 35: Messsystem („Array“) bestehend aus einem Geophon und vier Hydrophonen (MP5). Links: Foto; rechts: schematische Skizze

Gerät	Hersteller	Wichtige techn. Daten / Anzahl	Bemerkung / Einsatzort
Autonomes Unterwasserschallmesssystem (Abbildung 4.3)	itap	Frequenzbereich: 10 Hz- 20 kHz Aufnahmekapazität: ca. 50 h Anzahl: 4 Stk	Messsysteme MP1 bis MP4
Hydrophon TC 4033	RESON	Empfindlichkeit: ca. 0,5 pC/Pa Anzahl: 6 Stk	
Hydrophon P200	STN Atlas	Empfindlichkeit: ca. 1,4 pC/Pa Anzahl: 2 Stk	
Geophon SM 6B (Abbildung 4.4)	SEÑOR	Frequenzbereich: 0,1 Hz – 10 kHz Anzahl: 1 Stk.	Messsystem MP5 Array vom Ponton
Hydrophon TC 4013	RESON	Empfindlichkeit: ca. 0,12 pC/Pa Anzahl: 6 Stk	
Laptop VAIO	Sony		
Externe Soundkarte Fireface UC	RME	Anschluss über USB 2.0	
Leistungsverstärker	itap	0,1 mV/pC	In Verbindung mit allen Hydrophonen
Kalibrierungsquelle mit Ladungssignal	itap	Sinussignal 1 kHz, 10 – 100-1000 mV _{rms} und Ladung 100 pC _{rms}	Messsysteme mit Hydrophonen P200 und TC 4033
Druckkammer	itap	80 bis 160 Hz, 140 – 155 dB re 1µPa einstellbar	Kalibrierung von Hydrophonen und Messsystemen im Labor
Mikrofon-Kalibrator 4231	Brüel & Kjær		
Mikrofon 4189 und Vorverstärker 2671 als Referenz in Druckkammer	Brüel & Kjær		
Signal Analyzer 35670a	Hewlett-Packard		
GPS Tracker	Garmin		

Tabelle 5: Verwendete Geräte

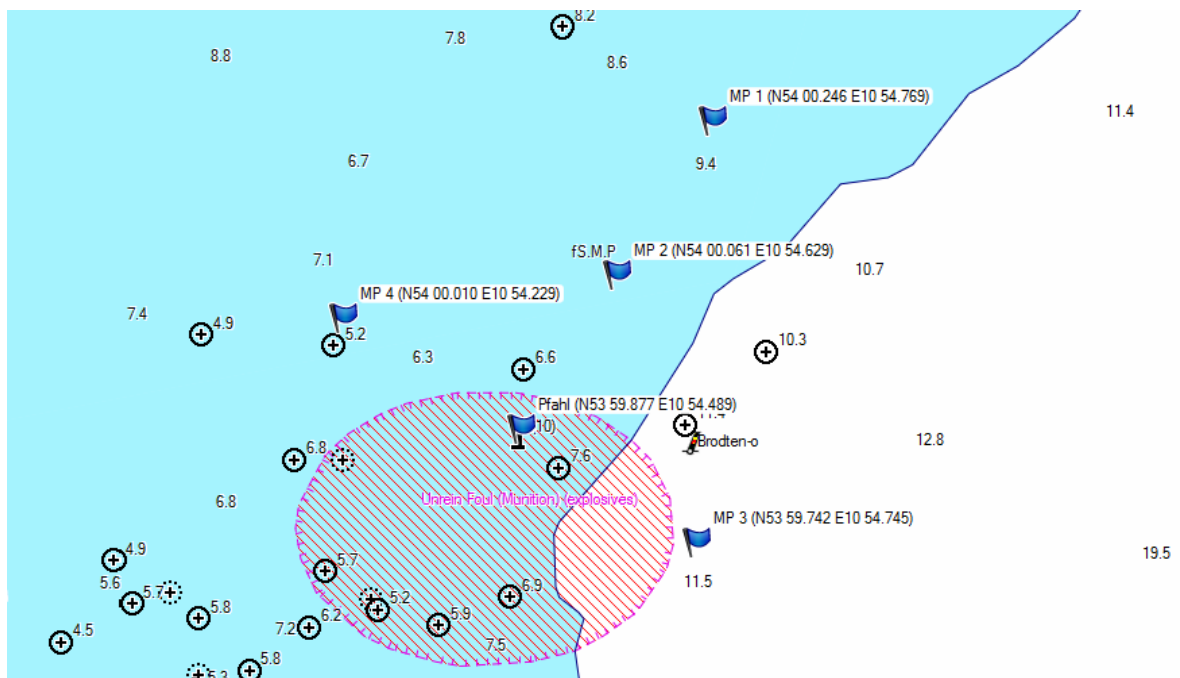


Abbildung 36: Verwendete Messpositionen

Nr	Messposition	Koordinaten	Abstand zum Pfahl [m]	Wassertiefe [m]	Sensor	Höhe über Grund [m]
1	MP1.1	54°00.246'	750	ca. 9,0	Hydrophon	1,8
2	MP1.2	10°54.769'			Hydrophon	3,6
3	MP2.1	54° 00.061'	375	ca. 7,7	Hydrophon	1,8
4	MP2.2	10°54.629'			Hydrophon	3,6
5	MP3.1	53°59.742'	375	ca. 11,5	Hydrophon	1,8
6	MP3.2	10°54.745'			Hydrophon	3,6
7	MP4.1	54°00.010'	375	ca. 6,0	Hydrophon	1,8
8	MP4.2	10°54.229'			Hydrophon	3,6
9	MP5.1	53°59.877' 10°54.489'	13	ca. 8,5	Hydrophon	1,8
10	MP5.2				Hydrophon	3,6
11	MP5.3				Hydrophon	5,4
12	MP5.4				Hydrophon	7,2
13	MP5.5				Geophon	0,0

Tabelle 6: Geographische Lage der verwendeten Messpositionen und ihre Bezeichnungen

7.2 Rammenergiemessung (PDM – Pile Drive Monitoring)

Beim Projekt ESRa wurden von der TU Braunschweig während der Tests rammbegleitend dynamische Probelastungen zur Erfassung der in den Pfahl eingeleiteten Energie durchgeführt. Die Messungen dienen dem Nachweis der Vergleichbarkeit der Tests.

Bei einer dynamischen Probelastung werden die durch den Hammerschlag erzeugten Dehnungen und Beschleunigungen unterhalb des Pfahlkopfes gemessen. Mit diesen zwei Messgrößen ist es möglich, die eingeleitete Energie in der Ebene der Messaufnehmer zu bestimmen. Die folgende Abbildung 37 vermittelt einen Eindruck der applizierten Sensoren am Brodtener Pfahl.



Abbildung 37: Messposition von Beschleunigungs- (rechts) und Dehnungssensor (links) am Brodtener Pfahl

Das Messequipment bestand aus um 180° versetzt am Pfahl angeordneten Messaufnehmerpaaren, jeweils bestehend aus 1 Dehnungsaufnehmer und 1 Beschleunigungsaufnehmer, die über Kabel mit dem Messcomputer verbunden waren. Das Messequipment wurde an den Pfahl unterhalb der Rammhaube angeschraubt (Abbildung 38).

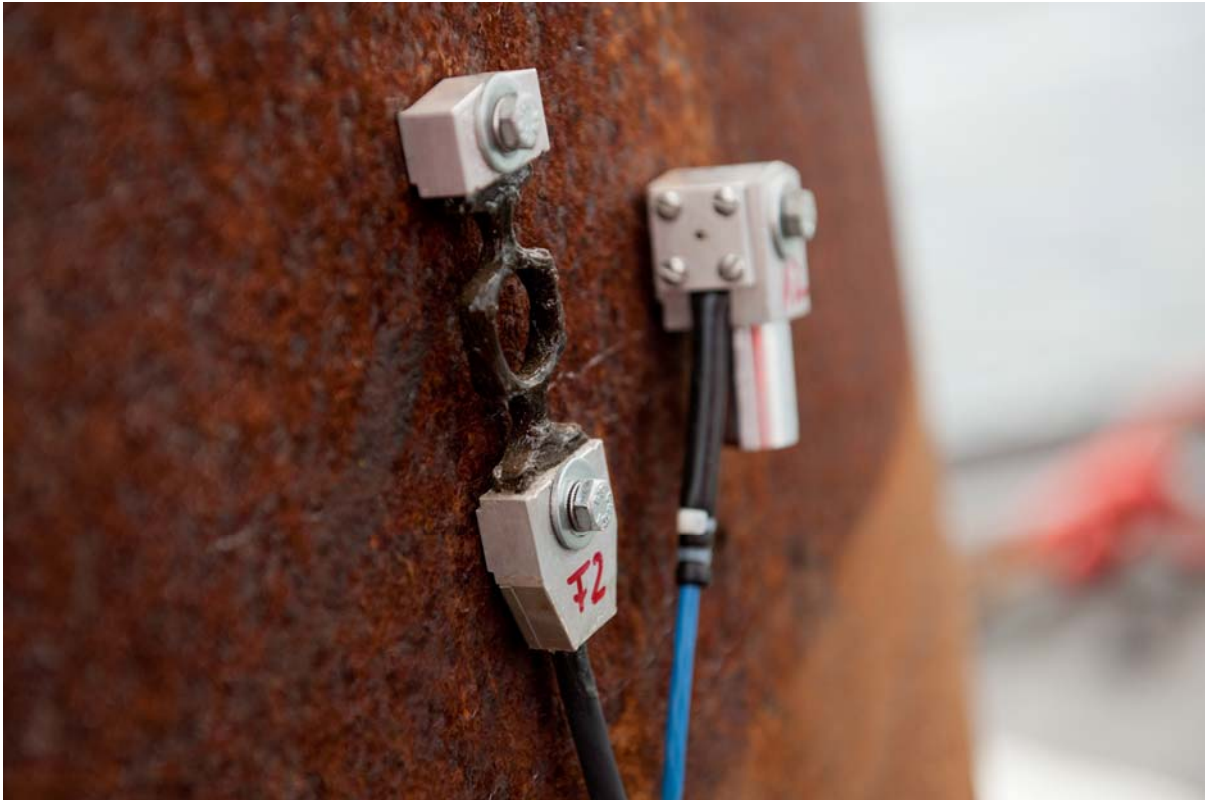


Abbildung 38: Details Messaufnehmer Pfahlenergiemessung (Foto: Patrice Kunte)

Die Tests am Brodtener Pfahl sahen jeweils 3 Schlagserien mit Schlagenergien von 100, 200 und 300 kNm vor. Jede Schlagserie bestand aus 20 Einzelschlägen. Nach diesem Schema wurde jedes eingesetzte Schallschutzsystem und jeweils eine Referenzmessung ohne Schallschutzsystem untersucht. Die nachfolgende Tabelle 7 enthält die durch die gemessene Dehnung und Beschleunigung errechnete Energie am Pfahlkopf [24]. Eine graphische Darstellung der Energien über die Schläge kann Kapitel 15, Appendix 2 entnommen werden.

7.3 Ablauf der Messungen

Sämtliche Messungen erfolgten im Zeitraum zwischen dem 21. und 24. August 2011. In der Tabelle 8 ist die Reihenfolge der untersuchten Schallminderungssysteme inkl. Variationen zusammengefasst. Insgesamt wurden 19 verschiedene Konfigurationen von Schallschutzsystemen inkl. vier Referenzkonfigurationen ohne Schallschutzsystem getestet.

Der Arbeitsponton wurde mittels zweier Schlepper am 21., 23. und 24. August vor dem Testpfahl positioniert. Mithilfe der pontoneigenen Stelzen wurde der Arbeitsponton in Position gehalten. Durch das mehrmalige Anfahren des Pontons an den Pfahl konnte die vorgegebene Position für die Messposition MP5 nicht jeden Tag metergenau erreicht werden.

In der Abbildung 39 ist ein schematischer Zeitplan des Messablaufes pro Tag dargestellt.

An jedem Versuchstag wurde zunächst die jeweilige Schallminderungsmaßnahme (NMS) installiert. Während dieser Zeit sind die vier autonomen Messsysteme an den Messpositionen MP1 bis MP4 mithilfe eines Crew-Bootes ausgebracht worden. Zusätzlich wurde das Hydrophon-Array mit dem Geophon mittels des bordeigenen Krans am 21., 23. und 24. August 2011 am Ponton zu Wasser gelassen (MP5).

Nr.	Datum	NMS	Eigenschaft/ Variation	Druck [bar]	Rammenergie [kJ]
1	21.08.2011	IHC NMS	mit Blasen- schleier zwi- schen Pfahl und IHC Rohr	7,0	100, 200, 300
2			ohne Blasen- schleier zwi- schen Pfahl und IHC Rohr	0,0	
3			Referenz (kein Schallschutzkonzept / NMS)		
4	22.08.2011	Menck Feuerweh- schlauchmethode mit zwei Reihen Schläuchen	Unterschiedlicher konstanter Druck innerhalb der Schläuche	1,0	100, 200, 300
5				2,0	
6			Referenz (kein Schallschutzkonzept / NMS)		
7	23.08.2011	Weyres Little Bubbles Curtain	Gestuft + geführt	7,9	100, 200, 300
8		Weyres BeKa Schale	mit Blasen- schleier	7,9	
9				5,0	
10			Ohne Blasen- schleier	0,0	
11		Referenz (kein Schallschutzkonzept / NMS)		300	
12	24.08.2011	Elmer Hydro Sound Damper	Mittlerer Ring	-	100, 200, 300
13			Mittlerer + äußerer Ring	-	
14			Alle Ringe	-	
15			Innerer + äußerer Ring	-	
16			Äußerer Ring	-	
17			Innerer Ring	-	
18			Innerer + mittlerer Ring	-	
19			Referenz (kein Schallschutzkonzept / NMS)		

Tabelle 8: Reihenfolge der untersuchten Schallminderungsmaßnahmen mit den jeweiligen Variationsmöglichkeiten.

Nach der Installation des jeweiligen Schallminderungssystems (NMS) wurde von der TU Braunschweig (TUBS) entsprechende Messsensorik zur Bestimmung der eingeleiteten Rammenergie am Pfahl befestigt (Pile Driving Monitoring, vgl. Kapitel 7.2). Anschließend erfolgten die Rammungen mit installiertem Schallminderungssystem.

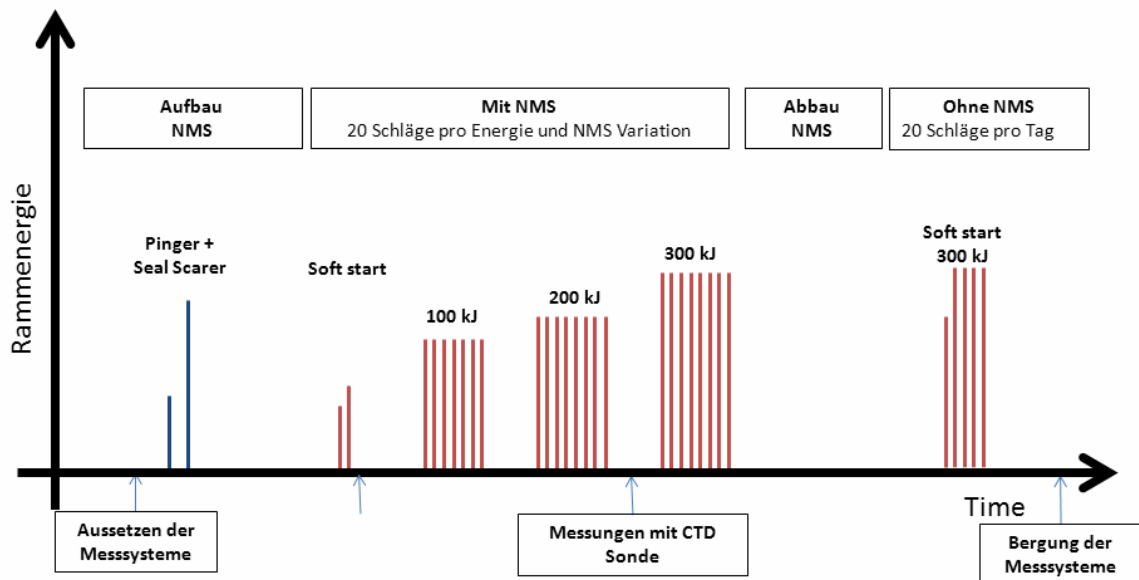


Abbildung 39: Schematisches Zeitdiagramm des Versuchsablaufs pro Messtag.

Anschließend wurde das jeweilige NMS abgebaut und eine Rammung am Pfahl ohne Schallschutzkonzept durchgeführt. Diese Rammungen werden im Folgenden als Referenzmessung bezeichnet.

Am ersten Versuchstag (21. August 2011) wurden die Referenzmessungen mit jeweils sechs Schlägen mit einer Rammenergie von 100, 200 und 300 kJ durchgeführt. An allen weiteren Tagen wurden 20 Schläge a 300 kJ Rammenergie durchgeführt.

Während jedes Messtages wurden mehrmals die Wassertemperatur, die Schallgeschwindigkeit und der Salzgehalt vom Ponton aus mittels einer CTD Messsonde ermittelt.

Sämtliche Messsensorik der itap GmbH wurde täglich nach Beendigung der Referenzrammung geborgen, mit Ausnahme des Hydrophon-Arrays (MP5) am 21. August 2011. Anschließend erfolgte täglich eine Datensicherung aller Messdaten.

Am 21. August 2011 ist das Messsystem an der Messposition MP4 aus technischen Gründen ausgefallen, so dass für diesen Tag und diese Messstation keine Messdaten vorhanden sind. In Tabelle 9 ist eine Zusammenstellung der erfolgten Messungen.

Insgesamt sind somit 52 verschiedene Rammvariationen (6 Referenzmessungen ohne Schallschutzsystem, 46 Messungen mit Schallschutzsystemen) mit insgesamt 13 Sensoren aufgezeichnet (Zeitsignale) und in eine Datenbank überführt worden.

Nr.	System	MP 1 (750m)	MP 2 (375m)	MP 3 (375m)	MP 4 (375m)	MP 5 (Array)
1	IHC Rohr mit Blaseschleier	☺	☺	☺	-	☺
2	IHC Rohr ohne Blaseschleier	☺	☺	☺	-	☺
3	Menck mit 1bar Druck	☺	☺	☺	☺	☺
4	Menck mit 2bar Druck	☺	☺	☺	☺	☺
5	Weyres Little Bubble Curtain	☺	☺	☺	☺	☺
6	Weyres BEKA 0 bar	☺	☺	☺	☺	☺
7	Weyres BEKA 5 bar	☺	☺	☺	☺	☺
8	Weyres BEKA 7 bar	☺	☺	☺	☺	☺
9	HSD M Ring	☺	☺	☺	☺	☺
10	HSD A Ring	☺	☺	☺	☺	☺
11	HSD I Ring	☺	☺	☺	☺	☺
12	HSD MA Ring	☺	☺	☺	☺	☺
13	HSD MI Ring	☺	☺	☺	☺	☺
14	HSD AI Ring	☺	☺	☺	☺	☺
15	HSD MAI Ring	☺	☺	☺	☺	☺
16	IHC Referenz	☺	☺	☺	-	☺
17	Menck Referenz	☺	☺	☺	☺	☺
18	Weyres Referenz	☺	☺	☺	☺	☺
19	HSD Referenz	☺	☺	☺	☺	☺

Tabelle 9: Zusammenstellung der erfolgten Messungen (☺ = korrekt; - = Messung nicht erfolgt).

7.4 Auswertungsmethode der akustischen Daten (itap)

Sämtliche Hydrophon- und Geophon-Signale liegen als WAV-Dateien vor. Die Samplingfrequenz der autonomen abgesetzten Messsysteme an den Positionen MP1 bis MP4 betrug $f_s = 44,1$ kHz. Die Signale liegen als Standard Stereo-WAV Dateien vor. Das Hydrophon-Array sowie das Geophon (MP5) besaßen eine Samplingfrequenz von $f_s = 96$ kHz. Die vier Hydrophone und das Geophon wurden zeitsynchronisiert aufgenommen und jeweils als Mono-WAV Datei abgespeichert.

In der Regel dauerte eine Rammung bei einer Rammenergie und einer Variation des gewählten Schallminderungssystems nicht länger als 60 s. Durch eine Hochpassfilterung (Grenzfrequenz 20 Hz, Butterworth-Filter 6. Ordnung) wurden zunächst die typischen durch Wind und ggfs. Wellenschlag erzeugten tieffrequenten Signalanteile bei den Hydrophon-Signalen abgeschwächt.

Durch die Bestimmung des energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} über jeweils 60 s und der zusätzlichen Zählung der in diesem Zeitraum erfolgten Rammschläge, erfolgte die Berechnung der mittleren Schallereignispegel L_E bzw. SEL mittels eines FFT-Verfahrens. Diese Vorgehensweise ist möglich, da die Störgeräusche zwischen den einzelnen Rammschlägen um mindesten 30 dB leiser waren als die Rammimpulse. Zunächst wurde eine FFT der Länge 2^{22} bzw. 2^{23} berechnet und anschließend in normierte Terzspektren (1/3-Oktave-Werte) umgerechnet. Aufgrund der hohen Frequenzauflösung ist diese Umrechnung auch bei niedrigen Frequenzen hinreichend genau. Für die Darstellung der Ergebnisse werden die Terzspektren auf den Frequenzbereich von 12,5 Hz bis 16 kHz beschränkt. Sämtliche mathematischen Operationen sind mittels eines im itap entwickelten Programms für Matlab von Mathworks durchgeführt worden. Das Programm wurde mithilfe eines Spektrumanalysators (HP35670a Dynamic Signal Analyzer) verifiziert.

7.5 Schallprognose

In der Planungsphase des Projektes ESRa stellte sich im Frühjahr 2011 heraus, dass der Testpfahl „Brodten-Ost“ in einem FFH-Gebiet liegt (Abbildung 40). Um das Forschungsprojekt dennoch durchführen zu können, wurde eine FFH-Vorprüfung [22] durchgeführt, um die Auswirkungen der bei den Tests entstehenden Schallemissionen auf die Meeresumwelt bewerten zu können. Bestandteil dieser Vorprüfung war

eine Schallprognose, durchgeführt von der itap GmbH. Die vollständige Schallprognose kann Kapitel 14: Appendix 1 entnommen werden.



Abbildung 40: FFH-Gebiet: „1931-301 Ostseeküste am Brodtner Ufer“

Abbildung 41 zeigt die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung nach dem PE-Modell für die Pfade 1 (zum Brodtener Ufer) und 2 (zur Fahrrinne). Dargestellt ist der Einzelereignispegel (SEL) eines Rammschlags an einem Empfänger in 2 m Tiefe. In westlicher Richtung (Pfad 1) nimmt der Schallpegel kontinuierlich ab; in der Nähe von Brodten sinkt der SEL 700 m von der Küstenlinie unter 150 dB re 1 μ Pa. Zum Strand hin sinkt er dann weiter auf etwa 130 dB re 1 μ Pa. In Richtung Südost (135°) nimmt der Schallpegel auf den ersten 1000 Metern vom Rammpfahl zunächst ähnlich stark ab, bleibt dann aber bis 3500 m bei 150 bis 155 dB re 1 μ Pa und sinkt erst 200 bis 300 m vor der Küstenlinie auf unter 150 dB re 1 μ Pa.

Die genannten Pegel nehmen zur Wasseroberfläche hin ab, wenn also die Empfängertiefe kleiner als 2 m ist. Mit steigender Tiefe steigt der Pegel dagegen leicht an, in 8 m Tiefe um etwa 3 dB gegenüber dem Wert in 2 m Tiefe.

In Richtung auf die offene See (Pfad 3, Abbildung 42) nimmt der Schallpegel mit wachsender Entfernung von der Ramme stetig ab. Der Berechnung zufolge wird der vom Umweltbundesamt entwickelte Vorsorgewert von 160 dB re 1 μ Pa in rund 1,6 km unterschritten.

In Abbildung 41 und Abbildung 42 ist zum Vergleich auch das Ergebnis der einfachen Rechnung mit der Thiele-Formel eingezeichnet. Da diese keine Wassertiefenprofile berücksichtigt, kann sie für die Strecken in Richtung Küste keine realitätsnahen Werte liefern. Für Richtung 3 stellt sie dagegen bis etwa 2 km Entfernung eine

brauchbare Näherung dar.

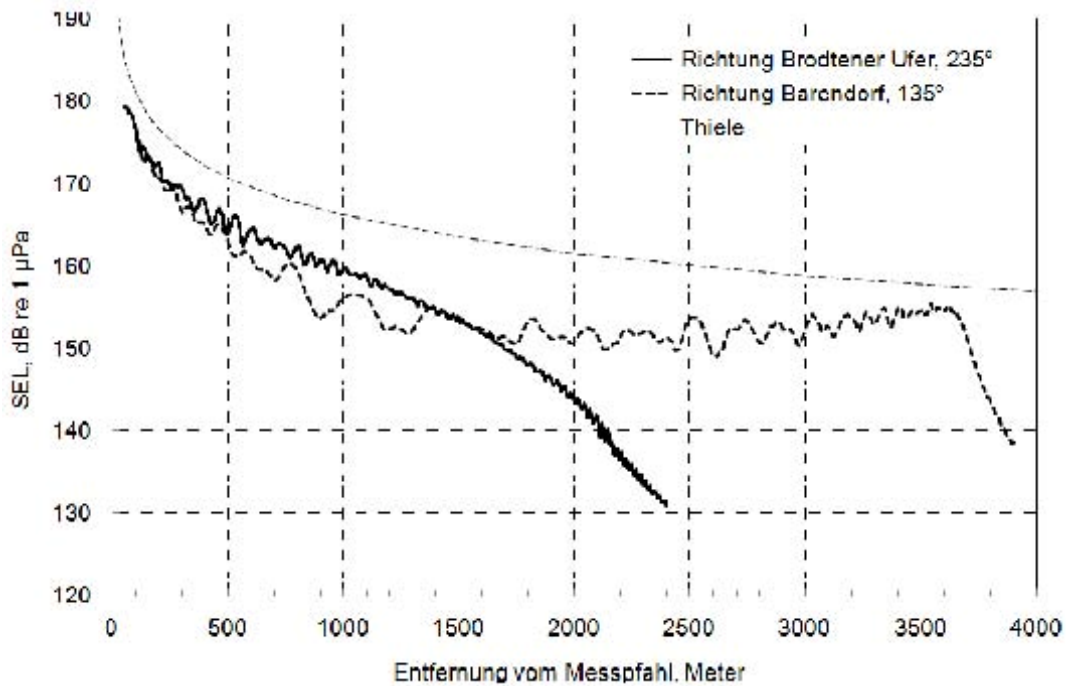


Abbildung 41: Prognostizierter Einzelereignispegel in 2 m Tiefe entlang der Strecken 1 und 2

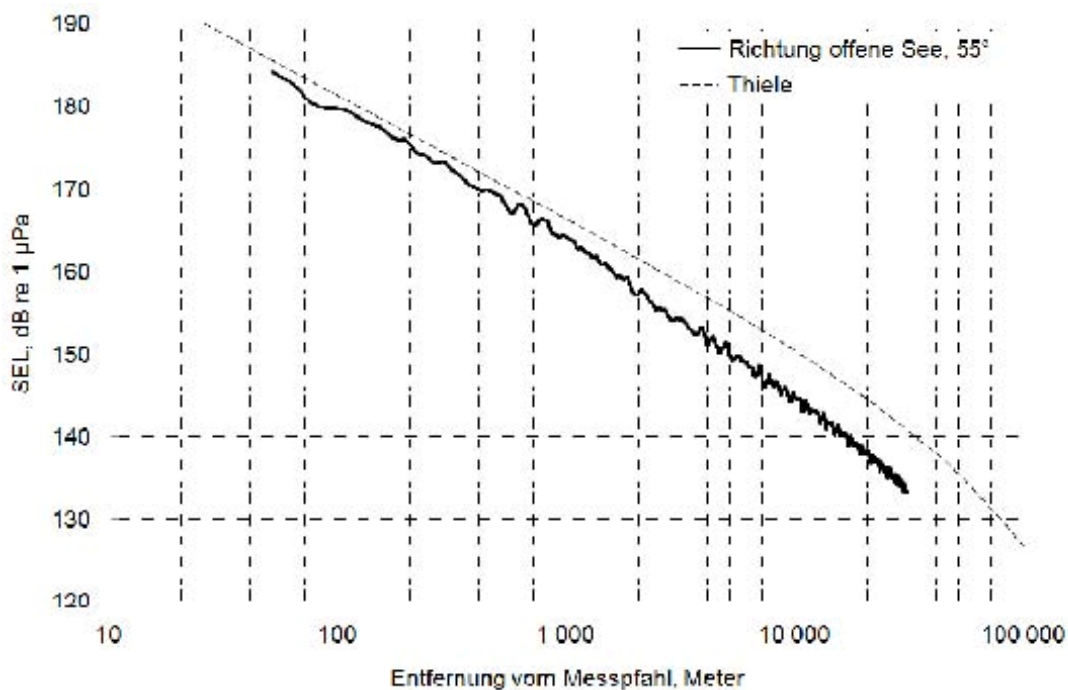


Abbildung 42: Prognostizierter Einzelereignispegel in 8 m Tiefe in nordöstlicher Richtung vom Pfahl

8. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Auswertungen der Unterwasserschallmessungen dargestellt. Kapitel 8.1 beschäftigt sich mit den eingeleiteten Rammenergien während der Untersuchungen. Im Kapitel 8.2 werden die während der Messungen vorherrschenden Wasserbedingungen (Schallgeschwindigkeit etc.) dargestellt. Anschließend werden der Einfluss der unterschiedlichen Messpositionen (Kapitel 8.3), der Schlagenergie (Kapitel 0), der Wassertiefe und der Entfernung (Kapitel 8.5) auf den Einzelereignispegel L_E bzw. SEL dargestellt. Diese Auswertung bezieht sich im Allgemeinen auf die Referenzbedingung, d. h. ohne den Einfluss eines Schallminderungskonzeptes. Im Kapitel 8.6 werden die Schallminderungspotenziale der fünf getesteten Schallminderungssysteme dargestellt und miteinander verglichen. Kapitel 8.7 enthält Nahfeldmessungen der TU BS. Der komplette Bericht über die Nahfeldmessungen der TU BS kann Kapitel 15, Appendix 2 entnommen werden. Dieser enthält auch numerische Berechnungen zur Schallausbreitung am Brodtener Pfahl.

8.1 Eingeleitete Rammenergie

Aus dem Messbericht der TU Braunschweig bzgl. der eingeleiteten Rammenergie am Testpfahl ist zu entnehmen, dass die angestrebten Rammenergien von 100, 200 und 300 kJ bei jedem Rammzyklus annähernd eingeleitet worden sind. Es existieren zwischen den einzelnen Schallminderungsmaßnahmen inkl. Variationen geringfügige Abweichungen (ca. 10%) in der eingeleiteten Rammenergie, die jedoch keinerlei größeren Einflüsse auf die Pegelwerte besitzen. Aus diesem Grund ist im Folgenden keine weitergehende Analyse der Messdaten bezogen, auf die tatsächlich eingeleitete Energie durchgeführt worden.

8.2 Auswertung der Wassereigenschaften

Die Wassereigenschaften Temperatur, Salzgehalt und Schallgeschwindigkeit haben sich über die vier Messdaten hinweg nicht signifikant verändert. In Abbildung 43 sind die Wassereigenschaften Temperatur, Salzgehalt und Schallgeschwindigkeit als Funktion der Wassertiefe einer repräsentativen Messung dargestellt. Es werden jeweils im Abstand von 0,5 m Wassertiefe bei dem Herunterlassen und bei dem Einbringen der CTD Sonde die Wasserbedingungen gemessen.

Aus Abbildung 43 ist zu entnehmen, dass sich sowohl die Temperatur als auch die Schallgeschwindigkeit über die Wassertiefe von 8,5 m kaum verändert. Die Schallgeschwindigkeit sinkt leicht um 5 m/s auf 1481 m/s am Boden ab. Die Temperatur sinkt von 17,6°C an der Wasseroberfläche auf minimal 15,7°C am Sediment ab. Der Salzgehalt bleibt über die Wassertiefe relativ konstant.

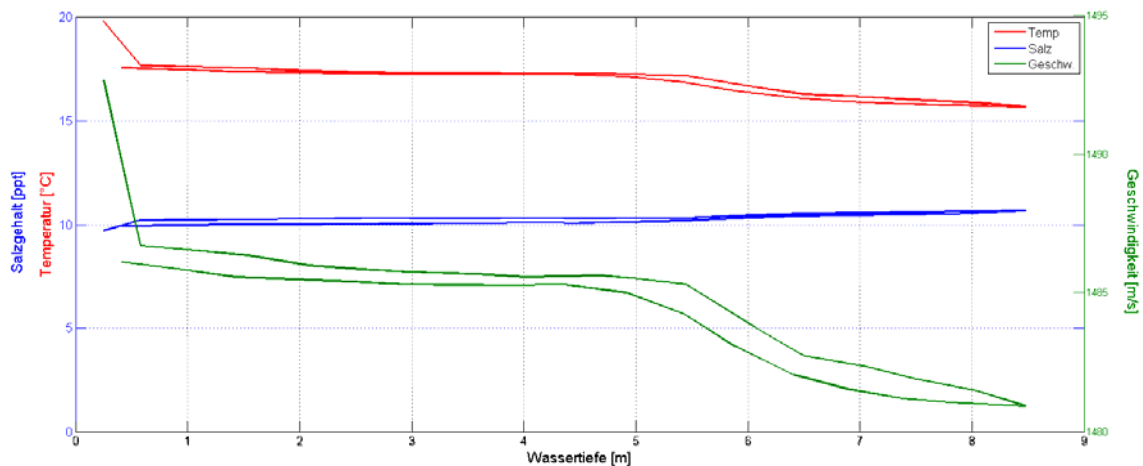


Abbildung 43: Wassereigenschaften (Temperatur – rote Linie, Salzgehalt - grün und Schallgeschwindigkeit - blau) während einer repräsentativen Messung.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Ostsee zum Zeitpunkt der Messungen gut durchmischt war und es keinerlei auffällige Wasserschichtungen gab.

8.3 Einfluss der unterschiedlichen Messpositionen auf den Einzelereignispegel (SEL)

In der Abbildung 44 sind die jeweiligen Terzspektren der Referenzmessungen (ohne Schallminderungsmaßnahme) für die vier Versuchstage an der Messposition MP1.1 (750 m Entfernung, 1,8 m Hydrophönhöhe – StUK 3 konforme Messposition) dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Terzspektren nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Kleinere Unterschiede in den einzelnen Terzspektren sind auf Messunsicherheiten und eine ggfs. nicht jeden Tag metergenaue Positionierung der Messsysteme zurückzuführen. Aufgrund der Ergebnisse aus Abbildung 44 werden für die Berechnung der Differenz-Terzspektren jedes Schallminderungssystems die jeweiligen Referenzmessungen des jeweiligen Tages verwendet.

In der Abbildung 45 sind die Terzspektren an den Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1, MP4.1 und MP5.1 (jeweils mit Hydrophondhöhe 1,8 m über Sediment) bei einer repräsentativen Referenzmessung (21.08.2011) im Vergleich dargestellt. Es zeigt sich, dass es bei den Messpositionen MP2.1 bis MP4.1 trotz gleichem Abstand zum Testpfahl zum Teil Unterschiede von bis zu ± 5 dB im 1/3-Oktavpegelwert auftreten. Einerseits können die Unterschiede in den Terzspektren teilweise durch die unterschiedlichen Wassertiefen bei definierten Frequenzen erklärt werden. Andererseits zeigen Wiederholungsmessungen bei Unterwasserschallmessungen in der Regel auch an derselben Messposition und bei vergleichbaren Anregungen Unterschiede in derselben Größenordnung.

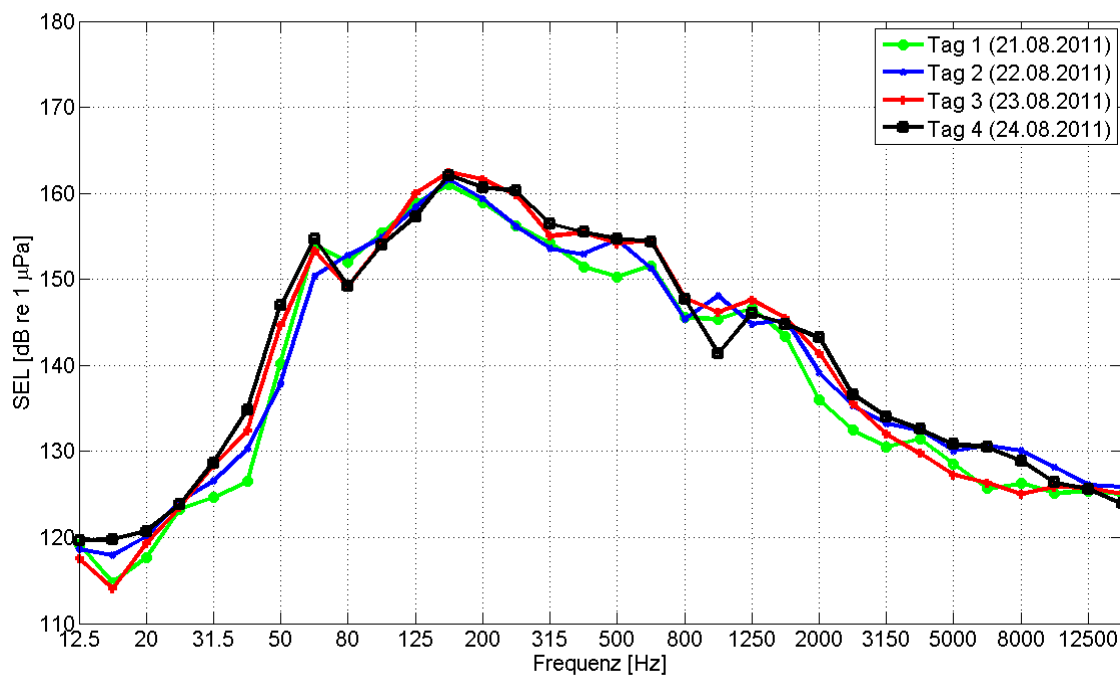


Abbildung 44: Terzspektren der Referenzmessungen (kein Schallminderungssystem) an der Messposition MP1.1 (750 m Entfernung, 1,8 m Hydrophondhöhe) bei einer Rammenergie von 300 kJ an den vier unterschiedlichen Mess-tagen.

Aus diesem Grund werden in den folgenden Kapiteln nicht nur die Einzelergebnisse der jeweiligen Messpositionen angegeben, sondern ebenfalls der Medianwert aus den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 für die Terzspektren und der Medianwert aus MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1 für die Dämpfung (Differenz der Terzspektren ohne und mit Schallminderungsmaßnahme, entspricht dem TL) dargestellt.

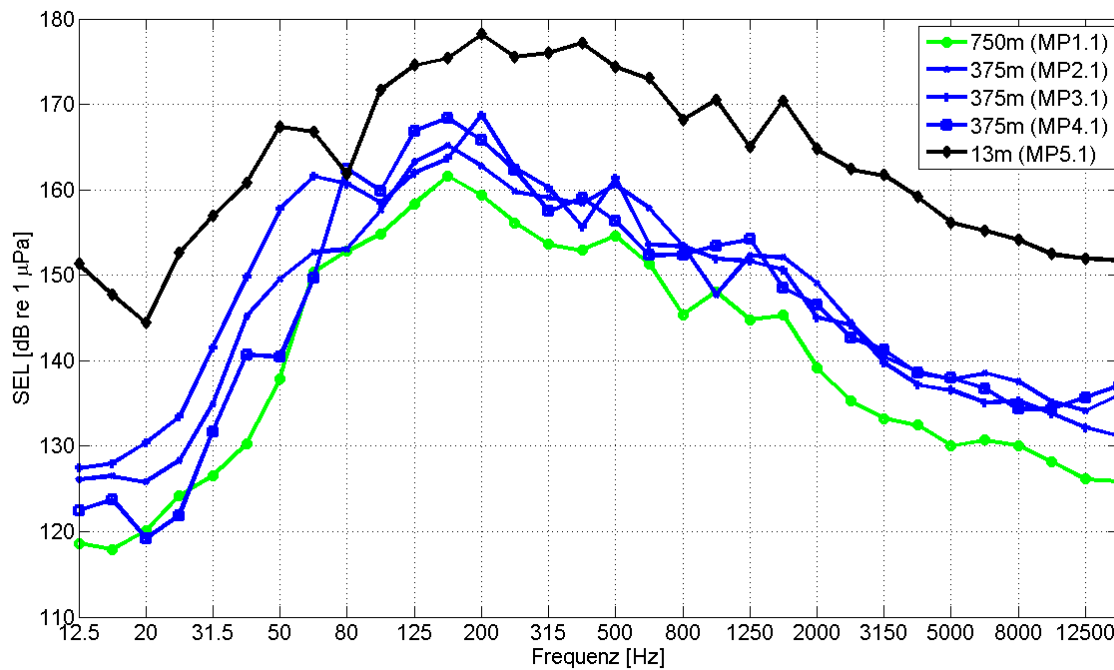


Abbildung 45: Terzspektren einer Referenzmessungen (kein Schallminderungssystem) an den Messposition MP1.1, MP2.1, MP3.1, MP4.1 und MP5.1 (Hydrophonhöhe 1,8 m über Sediment) bei einer Rammenergie von 300 kJ.

8.4 Einfluss der Schlagenergie auf den Einzelereignispegel (SEL)

8.4.1. Summenpegel

In der Abbildung 46 sind die Einzelereignispegel (Median des Summenpegels) bei den Referenzmessungen als Funktion der Schlagenergie und des Abstandes dargestellt.

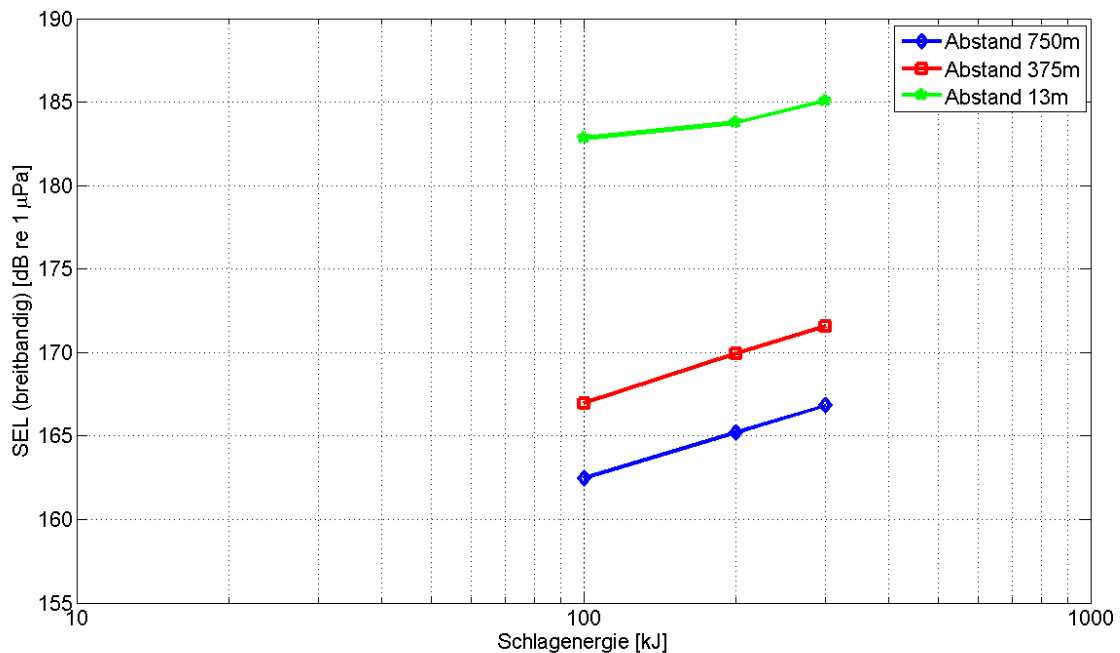


Abbildung 46: Einzelergebnispegel L_E bzw. SEL (Summenpegel) als Funktion der Schlagenergie und des Abstandes.

Aus vergleichbaren Studien geht hervor, dass ein Pegelanstieg von $\Delta L \approx k \log_{10}(E_2/E_1)$ dB mit $k = 10 \dots 15$ bei der Erhöhung der Schlagenergie von E_1 auf E_2 zu erwarten ist. Dies entspricht in etwa 3,0 bis 4,5 dB Zuwachs im SEL pro Verdopplung der Rammenergie. Bei den vorliegenden Ergebnissen ist im Fernfeld (Abstand 375 m bzw. 750 m) ebenfalls eine Zunahme von ca. 3 dB pro Verdopplung der Rammenergie messbar. Im Nahfeld in ca. 13 m Entfernung vom Pfahl ergibt sich eine deutlich geringere Konstante k .

Es sei hier nur erwähnt, dass der Faktor k in der Regel frequenzabhängig ist. Bei niedrigen Frequenzen ($f < 1$ kHz) liegt er im Bereich 10 bis 12, bei höheren Frequenzen steigt k auf Werte von >20 . Aufgrund der Tatsache, dass der größte Anteil der Energie sich im Bereich zwischen 80 und 500 Hz bei einem Rammschlag enthält, ist dieser Frequenzbereich in der Regel auch pegelbestimmend (siehe Abbildung 44 und Abbildung 45).

8.4.2. Schallminderung

In den Abbildung 47 und Abbildung 48 ist der Einfluss der Schlagenergie auf die Schallminderung (Dämpfung bzw. Differenz zwischen Terzspektren ohne und mit Schallminderungsmaßnahme) am Beispiel des Schallminderungssystems (System 1: IHC NMS) dargestellt.

In Abbildung 47 sind die frequenz aufgelösten Medianwerte ohne und mit Schallminderungsmaßnahme (NMS) über die Messpositionen MP2.1 bis MP4.1 (Abstand 375 m, Hydrophonhöhe 1,8 m über Sediment) für Schlagenergien von 100, 200 und 300 kJ dargestellt.

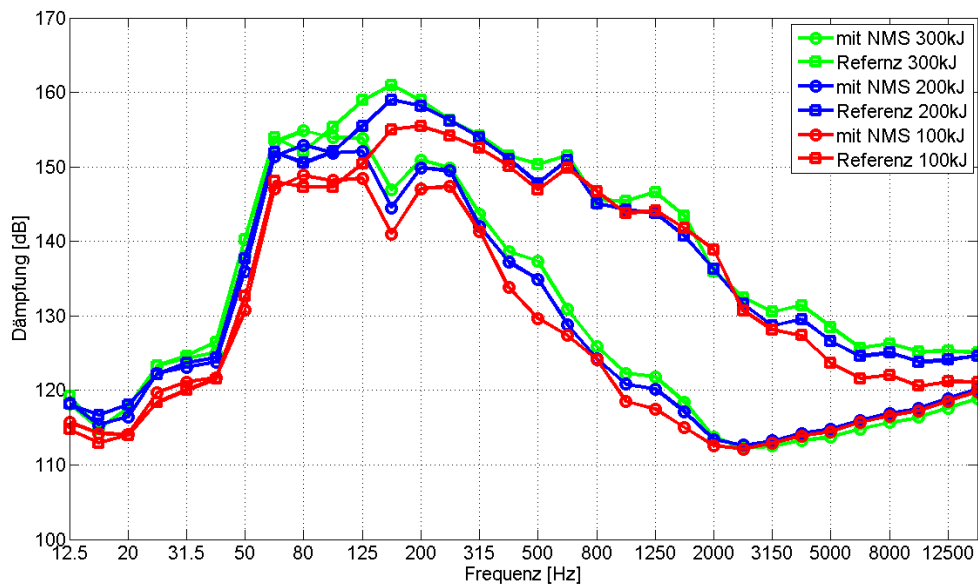


Abbildung 47: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem in Abhängigkeit der gewählten Schlagenergie

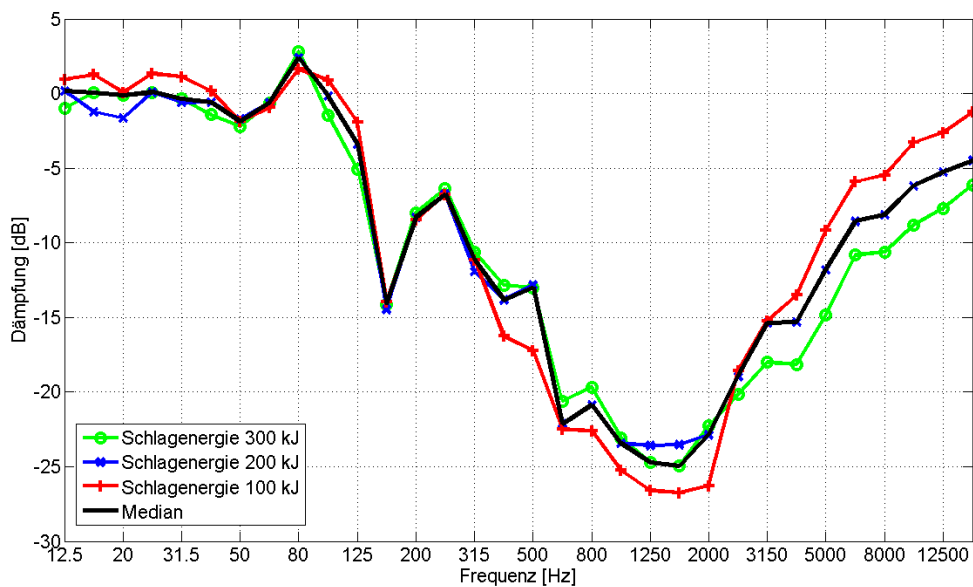


Abbildung 48: Dazugehöriges Differenzspektrum der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).

Es zeigt sich, dass mit reduzierter Schlagenergie sich die einzelnen 1/3-Oktavwerte, insbesondere zwischen 100 und 400 Hz, um 2 bis 4 dB reduzieren.

In Abbildung 48 sind die jeweiligen frequenz aufgelösten Medianwerte der Schallminderung über die Messpositionen MP1.1 bis MP4.1 (Abstand 375 m und 750 m, Hydrophönhöhe 1,8 m über Sediment) pro Schlagenergie dargestellt. Zusätzlich ist der Medianwert der Schallminderung über alle verwendeten Schlagenergien dargestellt.

Es zeigt sich, dass bis ca. 100 Hz keinerlei Schallminderung erzielt wird. Mit steigender Frequenz wird eine erhöhte Schallreduktion von bis zu 25 dB bei 1.250 Hz erreicht. Oberhalb von 1.600 Hz nimmt die Schallminderung wiederum leicht ab.

Es ergeben sich keine größeren Abweichungen zwischen den verwendeten Schlagenergien. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur noch die Ergebnisse für eine verwendete Schlagenergie von 300 kJ dargestellt.

8.5 Einfluss der Wassertiefe und der Entfernung zum Pfahl auf den Einzelereignispegel (SEL)

In Abbildung 49 sind die Einzelereignispegel (Summenpegel) in Abhängigkeit des Abstandes zum Pfahl, der Hydrophönhöhe und des Messtages dargestellt. Sämtliche dargestellte Einzelereignispegel wurden unter Verwendung einer gemittelten Schlagenergie von 300 kJ und ohne die Installation eines Schallminderungssystems ermittelt.

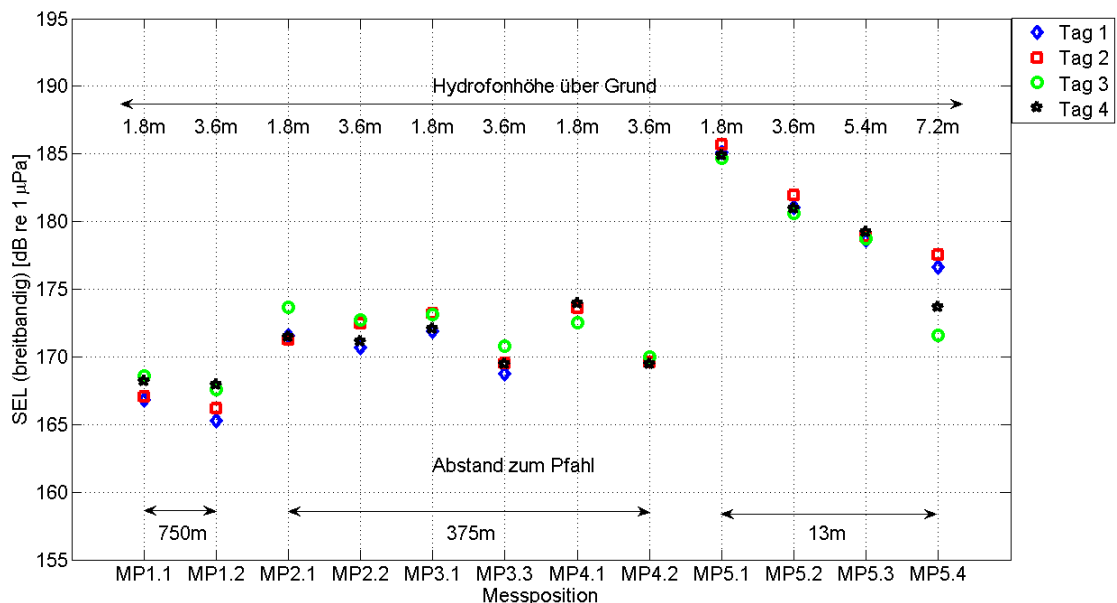


Abbildung 49: Einzelereignispegel L_E bzw. SEL (Summenpegel) als Funktion der Hydrofonhöhe über Grund und des Abstandes zum Testpfahl bei den Rammungen ohne Schallminderungsmaßnahmen (Schlagenergie 300 kJ).

Es zeigt sich, dass, bis auf Messposition MP5.1, kaum Abweichungen zwischen den Tagen 1 bis 4 bei gleicher Hydrofonhöhe (1,8 m) existieren. Kleinere Abweichungen sind durch die ggfs. geringfügigen Abweichungen der Wasserbedingungen, dem Abstand zum Pfahl und/oder der Tatsache der Messwiederholung (Messunsicherheit) zu erklären.

Im Vergleich der Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1, MP4.1 und MP5.1 zeigt sich, dass sich der Einzelereignispegel mit dem Abstand zum Pfahl deutlich verringert.

Mit zunehmender Hydrofonhöhe über Grund verringert sich der Einzelereignispegel um bis zu 3,5 dB (MP4.2). Diese Verringerung des Pegels ist durch die Theorie der Schallausbreitung im Wasser (Mehrfachreflexionen) durchaus zu erwarten.

Im Fall der Messposition MP5 nimmt der Pegel zur Wasseroberfläche um bis zu 13 dB ab. Die deutlichen Unterschiede zwischen den Tagen 1 und 2 zu 3 und 4, sind mit den unterschiedlichen Positionen des Arbeitspontons vor dem Pfahl und den damit verbundenen Wassertiefen zu begründen. Am Tag 3 befand sich die Messpositi-

on MP5.4 kurz unterhalb der Wasseroberfläche, sodass der Schalldruckpegel aufgrund des zu erwartenden Impedanzsprunges zwischen Wasser und Luft (schallweicher Abschluss) gegen Null gehen muss.

In Abbildung 50 ist der Einzelereignispegel (Summenpegel) aus Abbildung 49 der Hydrophone 1,8 m über Grund (MP1.1 bis MP5.1) als Funktion des Abstandes zum Pfahl dargestellt. Hierbei wird aufgrund der geringen Unterschiede kein Unterschied zwischen den einzelnen Messtagen vorgenommen. Zusätzlich ist, ausgehend von der Messposition MP1.1 (StUK 3 konforme Messposition), der SEL als Funktion des Abstandes mit der Formel von Thiele & Schellenstede (Gleichung 2.9) mit dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung des berechneten SEL-Wertes (rote Linie) bei 375 m mit den Messdaten (blaue Rauten). Für die Messdaten in ca. 13 m Entfernung zum Pfahl (MP5.1) ergibt sich eine Differenz von ca. 10 dB zu den berechneten Werten. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass die Berechnungsformel von Thiele & Schellenstede [4] ausdrücklich nur für Teile der Nordsee und einer vollständigen Durchmischung der Wassersäule definiert ist. Es zeigt sich jedoch trotzdem für das „Fernfeld“ (375 m bis 750 m) eine gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und Berechnung. In der Literatur existieren Vergleiche zwischen dem berechneten und gemessenen SEL in Entfernungen bis mehrere Kilometer [23], die eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung im Fernfeld bestätigen. Für das akustische „Nahfeld“ ergeben sich hingegen erhebliche Unterschiede zwischen den Werten der Berechnungsformel von Thiele & Schellenstede und den Messdaten.

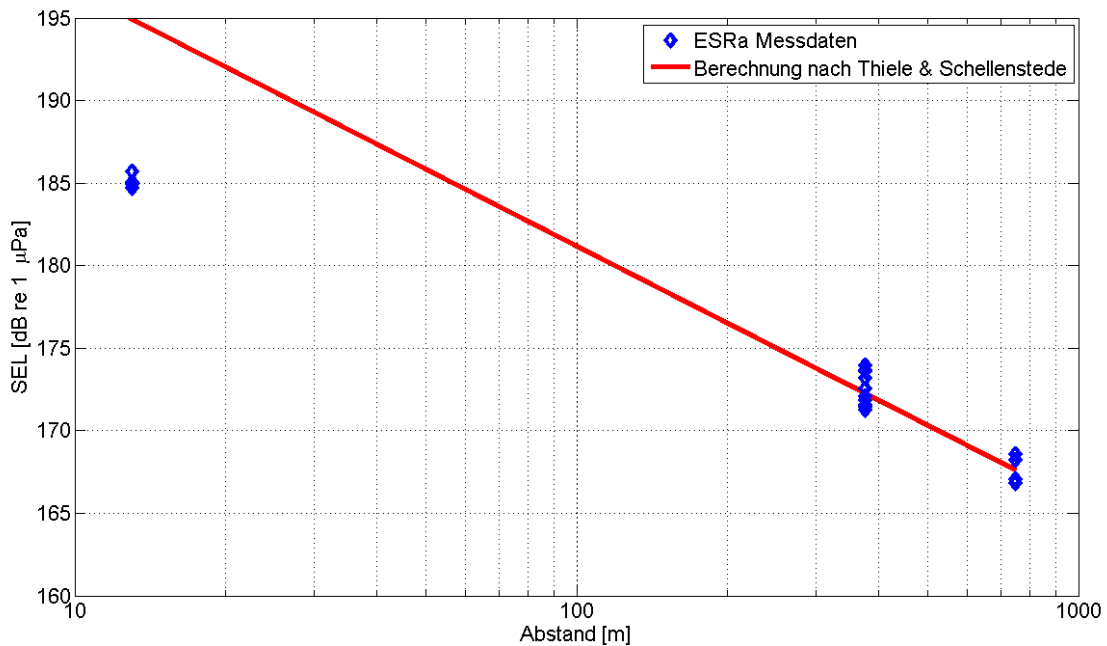


Abbildung 50: Einzelereignispegel L_E bzw. SEL (Summenpegel) als Funktion des Abstandes zum Testpfahl bei den Rammungen ohne Schallminderungsmaßnahmen (Schlagenergie 300 kJ). Zusätzlich ist der nach Thiele & Schellenstede [4] zu erwartende (berechnete) Einzelereignispegel als Funktion des Abstandes mit dargestellt.

8.6 Nah- und Fernfeldmessungen (itap)

8.6.1. Ergebnisse der Schallminderungssysteme im Fernfeld

Zur Verdeutlichung der Durchgangsdämpfung (engl. Transmission Loss – TL) der einzelnen Schallminderungsmaßnahmen werden im Folgenden nicht nur die einzelnen Terzspektren dargestellt, sondern ebenfalls die Differenz-Terzspektren ohne (Referenz) und mit Schallminderungsmaßnahme. Bei der Darstellung der Terzspektren werden jeweils die frequenz aufgelösten Medianwerte über die Messpositionen MP2.1 bis MP4.1 (Abstand 375 m zum Pfahl) verwendet. Zur Veranschaulichung der Schallminderung der einzelnen Systeme (Schaldurchgangsdämpfung) werden die Medianwerte der Messpositionen MP1.1 bis MP4.1 verwendet (Abstand 375 m und 750 m zum Pfahl).

a) System 1: IHC NMS

Das IHC NMS System wurde einmal mit einem zwischen Testpfahl und IHC NMS System liegenden Blasenschleier und einmal ohne Blasenschleier getestet. Der Blasenschleier wurde mit einem Luftdruck von 7,0 bar kompressorseitig erzeugt. In Abbildung 51 und Abbildung 52 sind die Terzspektren mit und ohne Schallminderungsmaßnahme bzw. das Differenzspektrum ohne / mit Schallminderungsmaßnahme für das IHC NMS System dargestellt (Dämpfung).

Aufgrund eines Ausfalls des autonomen Messsystems an der Messposition MP4.1 sind keinerlei Daten für diese Position vorhanden.

b) System 2: Menck Feuerwehrschauch

Das Schallminderungssystem der Fa. Menck („Feuerwehrschauchmethode“) wurde mit zwei unterschiedlichen konstanten Luftdrücken innerhalb der beiden geschlossenen Feuerwehrschauchringe von 1,0 und 2,0 bar kompressorseitig durchgeführt. In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die Terzspektren mit und ohne Schallminderungsmaßnahme bzw. das Differenzspektrum ohne / mit Schallminderungsmaßnahme dargestellt.

c) System 3: Weyres Little Bubble Curtain

Der LBC wurde mit nur einem Luftdruck getestet (kompressorseitig 7,9 bar). In Abbildung 55 und Abbildung 56 und 5.14 sind die Terzspektren mit und ohne Schallminderungsmaßnahme bzw. das Differenzspektrum ohne / mit Schallminderungsmaßnahme dargestellt.

d) System 4: BeKa-Schale

Die BeKa-Schale wurde in drei Variationen getestet: i) + ii) mit innenliegendem Blasenschleier mit einem Luftdruck von 2,9 und 7,0 bar kompressorseitig und iii) ohne Blasenschleier. Eine vierte Variation mit dem Auspumpen des Wassers zwischen BeKa-Schale und Testpfahl wurde aus sicherheitstechnischen Gründen nicht durchgeführt. In Abbildung 57 und Abbildung 58 sind die Terzspektren mit und ohne Schallminderungsmaßnahme bzw. das Differenzspektrum ohne / mit Schallminderungsmaßnahme dargestellt.

e) System 5: Elmer Hydro Sound Damper

Der Elmer Hydro Sound Damper verfügte über drei unterschiedliche Ringe (I – innerer Ring; M – mittlerer Ring; A – äußerer Ring), die in allen Permutationen herabgelassen und getestet wurden. Insgesamt ergaben sich sieben Variationsmöglichkeiten. In Abbildung 59 und Abbildung 60 sind die Terzspektren mit und ohne Schallminderungsmaßnahme bzw. das Differenzspektrum ohne / mit Schallminderungsmaßnahme dargestellt.

f) Vergleich aller Schallminderungsmaßnahmen

In der Praxis wird bei dem Monitoringverfahren in Anlehnung an StUK 3 der Einzelereignispegel (SEL, breitbandig bzw. Summenpegel) ermittelt und mit dem Vorsorgewert von 160 dB in einem Abstand von 750 m Entfernung verglichen. Aus diesem Grund sind in der Tabelle 10 die jeweiligen SEL-Werte (Zeile 3) und die L_{peak} -Werte (Zeile 4) für jede Messung an der StUK 3 konformen Messposition MP1.1 (750 m Abstand, unteres Wasserdrittel) zusammengefasst. Zusätzlich sind in der Tabelle 10, Zeile 5 und 6 ebenfalls die Schallminderungspotenziale (Differenzen ohne und mit Schallminderungsmaßnahmen) für den SEL und den L_{peak} als Medianwert über die Messpositionen MP1.1 bis MP4.1 zusammengefasst.

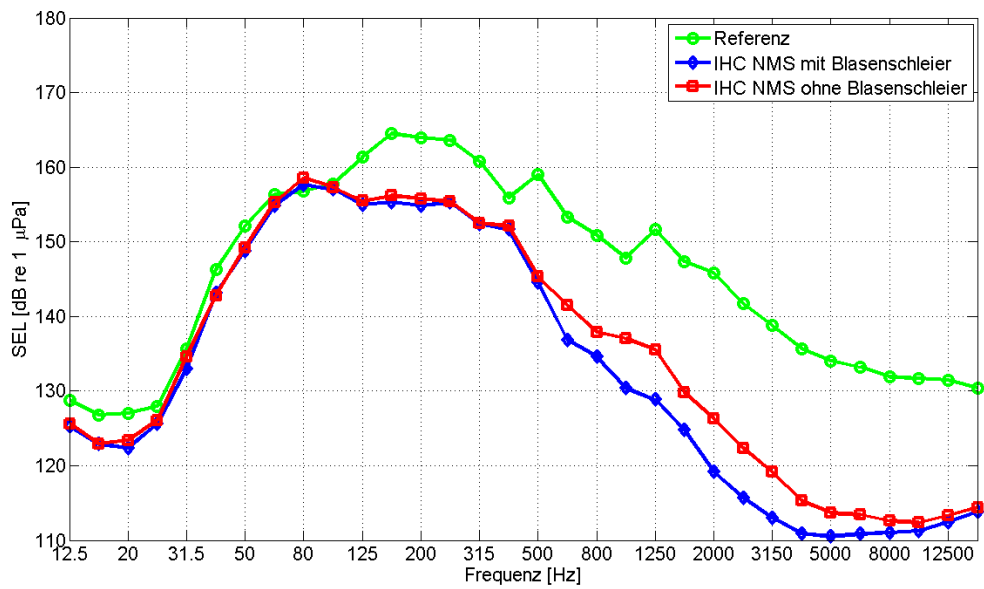


Abbildung 51: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1 und MP3.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem für das IHC NMS System mit und ohne innenliegendem Blasenschleier

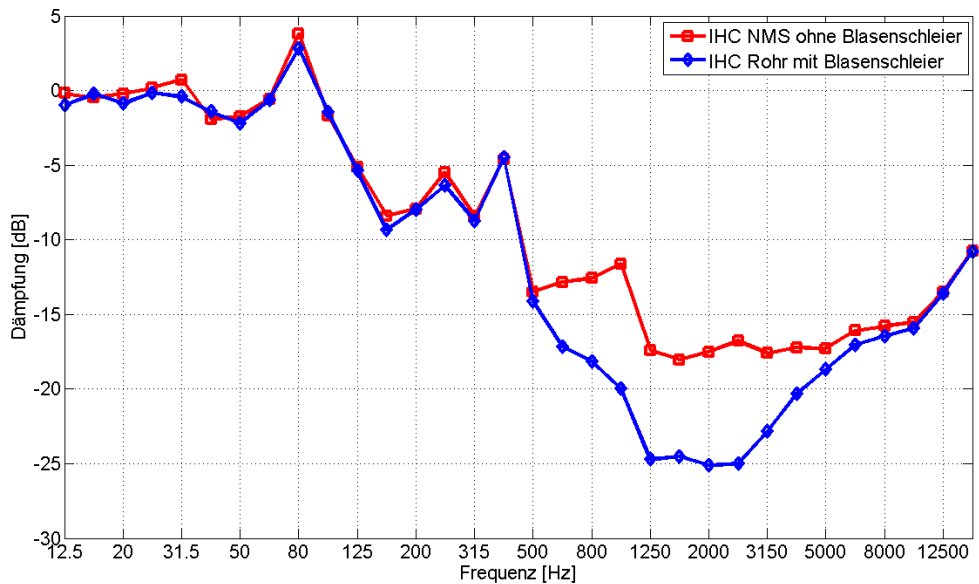


Abbildung 52: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition

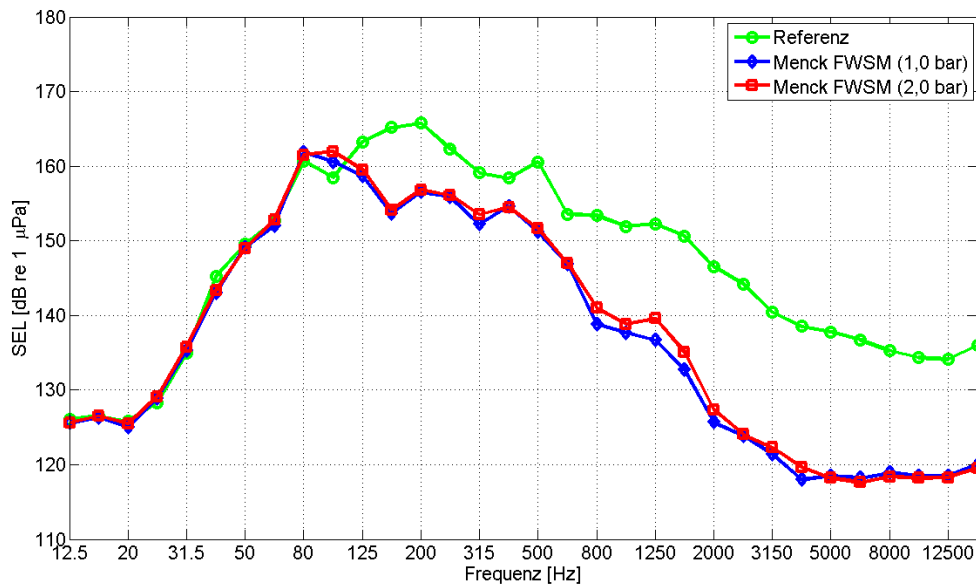


Abbildung 53: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophonhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem für die Feuerwehrschauchmethode der Fa. Menck mit zwei unterschiedlichen Luftdrücken.

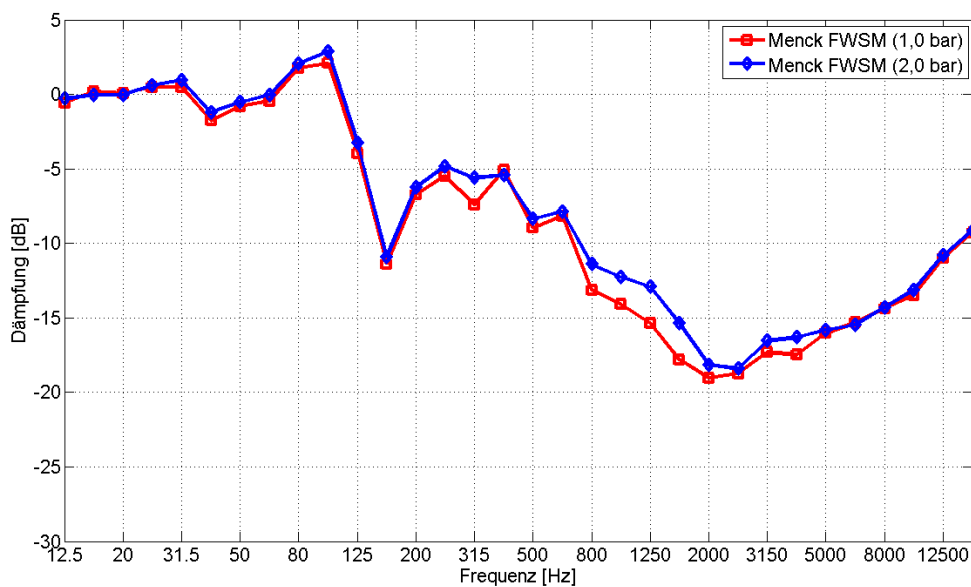


Abbildung 54: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition.

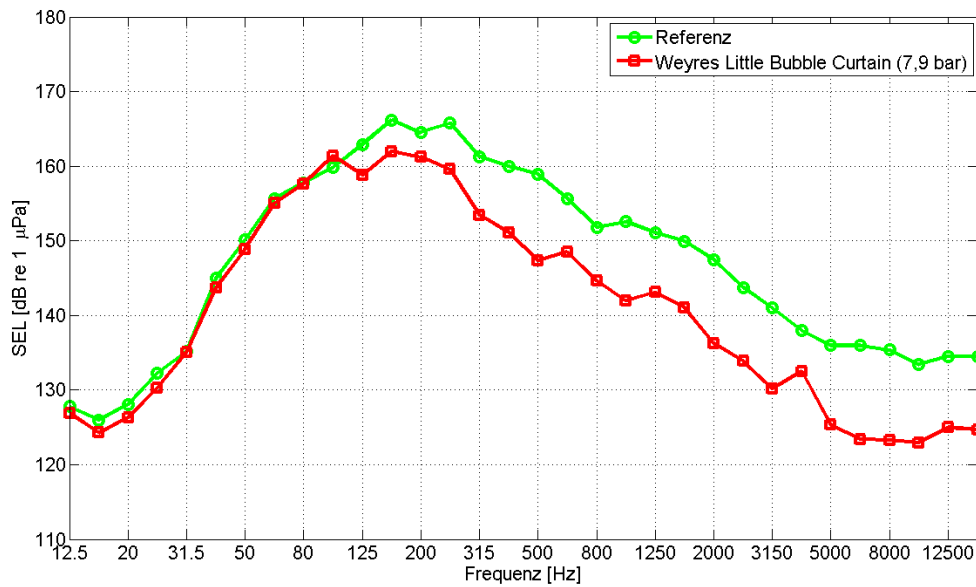


Abbildung 55: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophonhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssysteme für den Little Bubble Curtain der Fa. Weyres

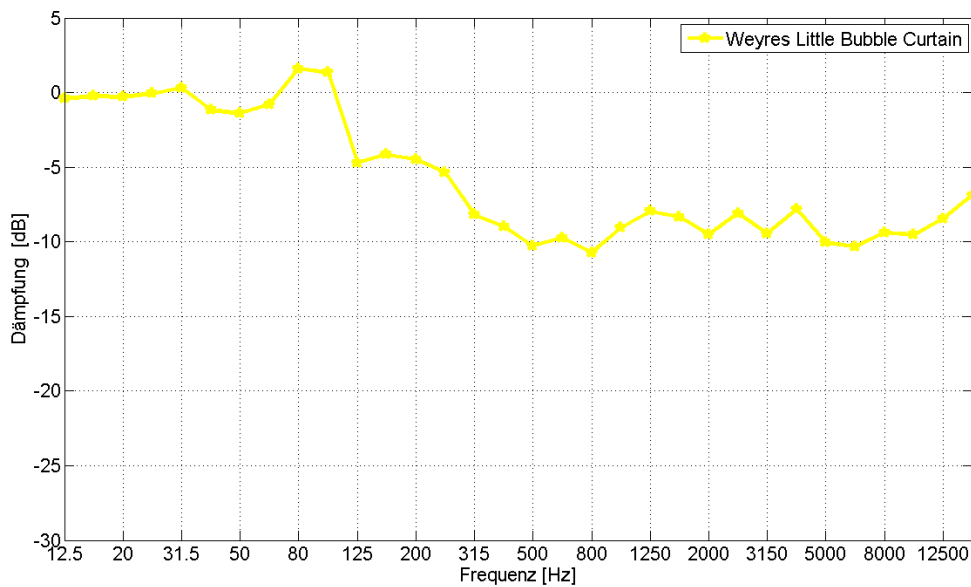


Abbildung 56: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).

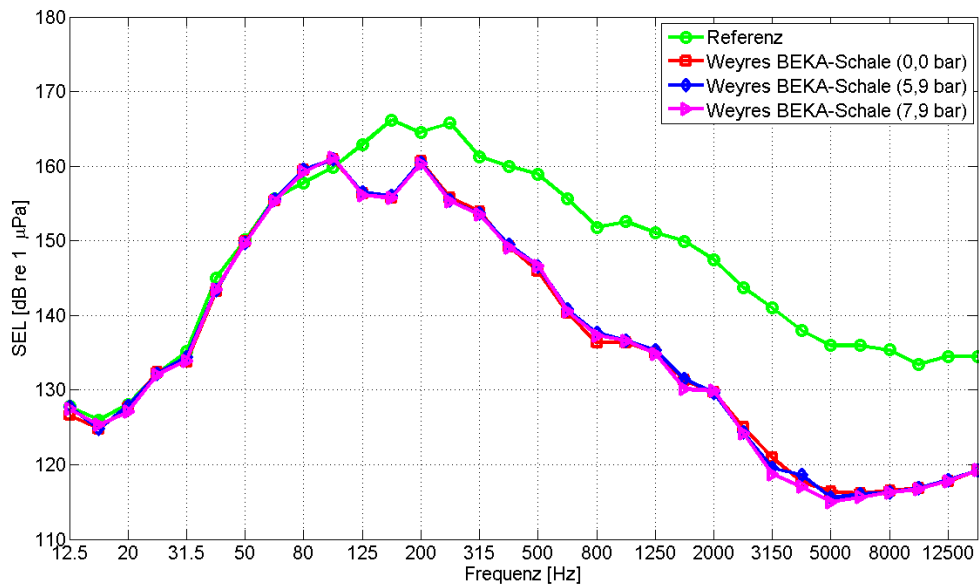


Abbildung 57: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophonhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssysteme für die BeKa-Schale mit und ohne innenliegendem Blasenschleier der Fa. Weyres

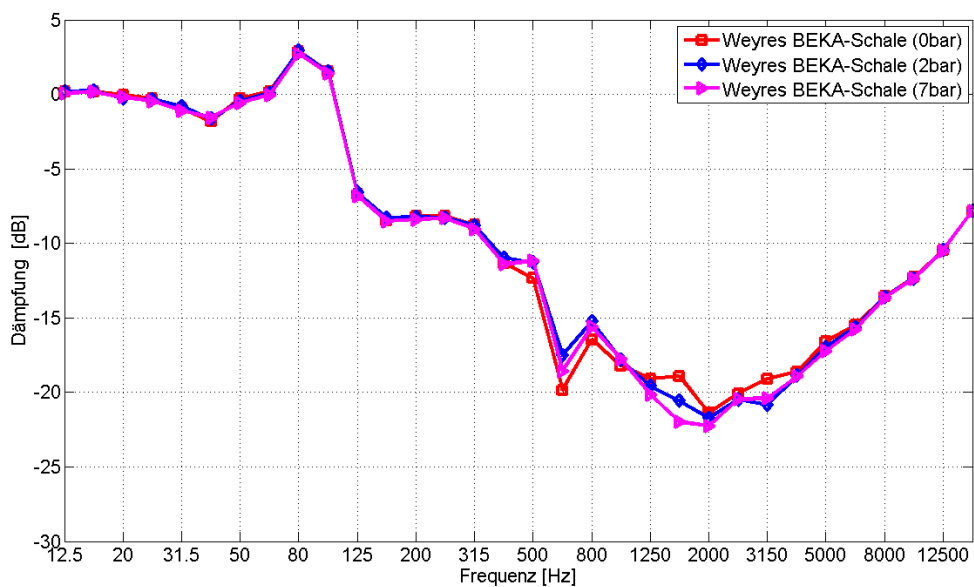


Abbildung 58: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).

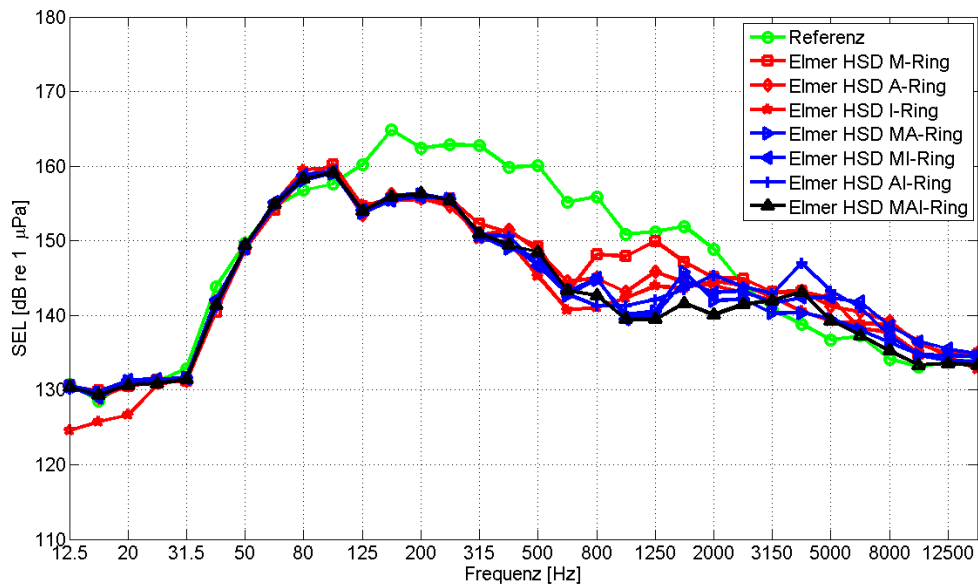


Abbildung 59: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophonhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem des Elmer Hydro Sound Dampers. Durch die (I – innerer Ring; M – mittlerer Ring; A – äußerer Ring) drei Ringe ergaben sich sieben Variationsmöglichkeiten

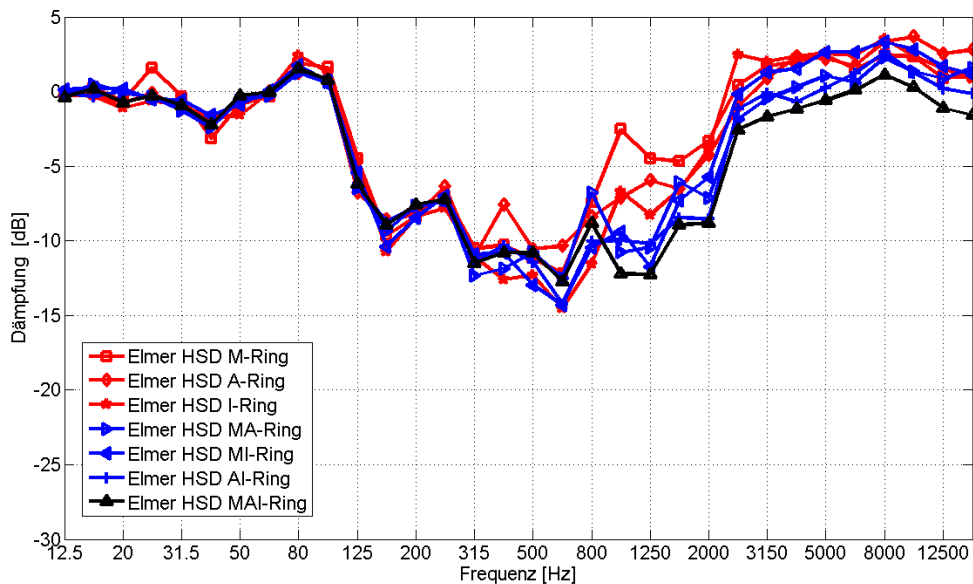


Abbildung 60: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).

Es ergeben sich (breitbandig) im Median Schallreduzierungen von 4,4 dB (Menck FWSM mit einem Druck von 2,0 bar) bis 6,1 dB (Weyres BeKa-Schale mit innenliegendem Blasenschleier mit 7 bar).

Nr.	System	Schallminderungssystem	Abstand 750 m (MP1.1)		Differenz ohne/mit Schallminderungssystem (Median über MP1.1, MP2.1, MP3.1, MP4.1)	
			SEL [dB]	L _{peak} [dB]	ΔSEL [dB]	ΔL _{peak} [dB]
1	1	IHC NMS mit Blasenschleier	161,0	183,2	5,6	6,9
2		IHC NMS ohne Blasenschleier	161,7	184,1	5,1	6,0
3	2	Menck FWSM mit 1,0 bar	162,8	185,4	5,0	4,5
4		Menck FWSM mit 2,0 bar	162,2	184,8	4,4	5,1
5	3	Weyres LBC	164,2	188,2	4,2	4,0
6	4	Weyres BeKa 0 bar	162,3	184,8	5,9	7,4
7		Weyres BeKa 5 bar	162,4	184,6	5,9	7,6
8		Weyres BeKa 7 bar	162,2	184,6	6,1	7,6
9	5	Elmer HSD M Ring	162,4	186,3	5,0	6,2
10		Elmer HSD A Ring	162,2	185,2	4,2	7,3
11		Elmer HSD I Ring	162,4	186,7	5,4	5,8
12		Elmer HSD MA Ring	161,2	184,9	5,4	7,6
13		Elmer HSD MI Ring	162,0	186,3	4,9	6,2
14		Elmer HSD AI Ring	162,0	184,6	5,4	7,9
15		Elmer HSD MAI Ring	162,0	184,7	5,4	7,8
16	Referenz	IHC NMS Referenz	166,8	190,1	-	-
17		Menck FWSM Referenz	167,0	189,9	-	-
18		Weyres LBC + BeKa Referenz	168,6	192,2	-	-
19		Elmer HSD Referenz	168,2	192,5	-	-

Tabelle 10: Zusammenfassung der Schallminderungspotenziale der getesteten fünf Schallminderungssysteme inkl. Variationen. Zusätzlich sind der Einzelergebnispegel (SEL) und der L_{peak} an der StUK 3 konformen Messposition MP1.1 dargestellt.

Es zeigte sich jedoch in den vorangehenden Abschnitten a) bis e), dass die Schallminderung stark frequenzabhängig ist. Zusätzlich ergeben sich zum Teil größere Streuungen durch Wiederholungen, bzw. an verschiedenen Messpositionen für die jeweiligen Schallminderungen.

Zum Vergleich aller Schallminderungssysteme sind in Abbildung 61 die Schallminderungspotenziale bzw. Schalldurchgangsdämpfung (Differenz zwischen Terzspektren ohne und mit Schallminderungsmaßnahmen) aller Systeme in einer Graphik zusammengefasst worden.

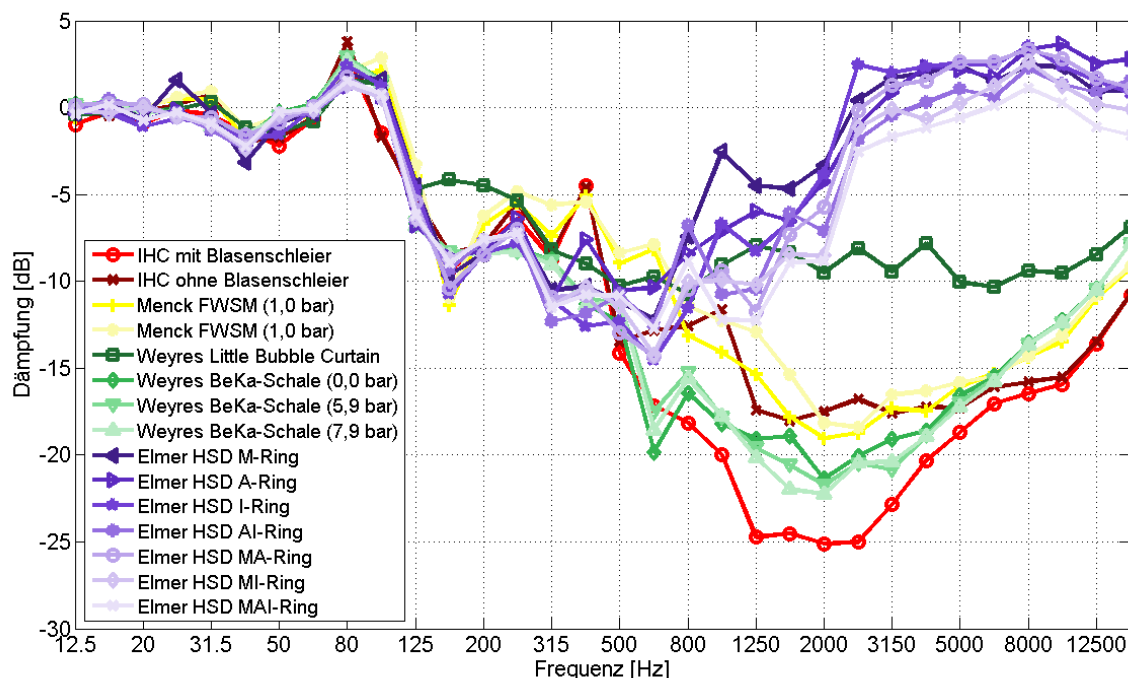


Abbildung 61: Dargestellt sind die Schalldurchgangsdämpfung bzw. Differenzspektrum zwischen mit und ohne NMS (Medianwert über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1) der getesteten Schallminderungsmaßnahmen im Überblick.

8.6.2. Ergebnisse der Schallminderung im Nahfeld

Im Kapitel 8.6.1 sind die Ergebnisse der Schallminderung aller Systeme gemessen im Fernfeld (375 m bis 750 m Entfernung) dargestellt worden. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messposition MP5 im Nahfeld des Pfahls (13 m) kurz dargestellt.

In Abbildung 62 sind die Terzspektren der Referenzkondition (ohne Schallschutzmaßnahme) der Messposition MP5 in unterschiedlichen Hydrophonhöhen über Grund gegenübergestellt.

Es ergeben sich erhebliche Unterschiede in den Terzspektren gemessen in unterschiedlichen Höhen über Grund. Tendenziell nehmen die tieffrequenten Anteil mit zunehmendem Abstand zum Sediment deutlich ab. Dieser Effekt beträgt bis zu 20 dB (z.B. bei $f = 125$ Hz).

In Abbildung 63 sind die Schalldurchgangsdämpfung für eine repräsentative Schallminderungsmaßnahme aus dem Nahfeld in unterschiedlichen Höhen dargestellt.

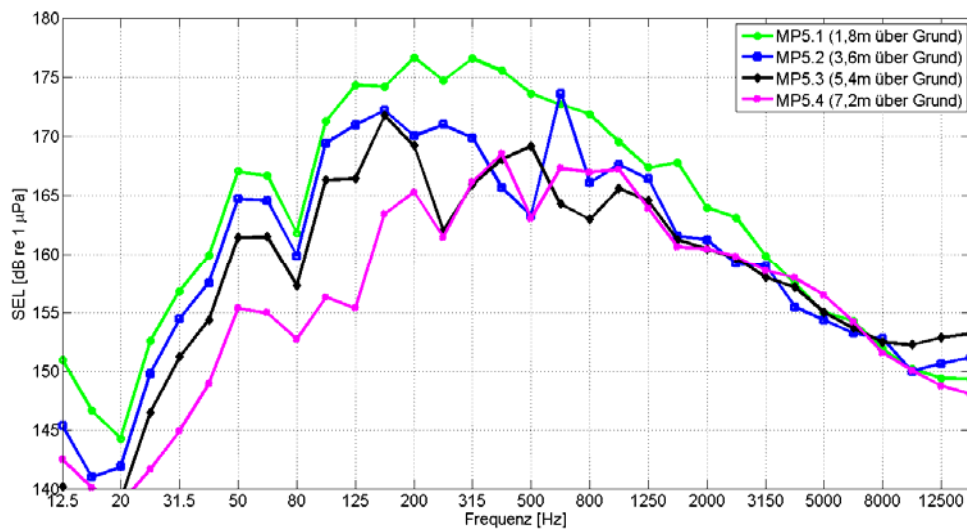


Abbildung 62: Dargestellt sind die Terzspektren der Referenzkondition (ohne Schallminderungssystem) gemessen an der Messposition MP5 in unterschiedlichen Höhen (Hydrophonhöhe 1,8 m, 3,6 m, 5,4 m und 7,2 m; Abstand zum Pfahl 13 m).

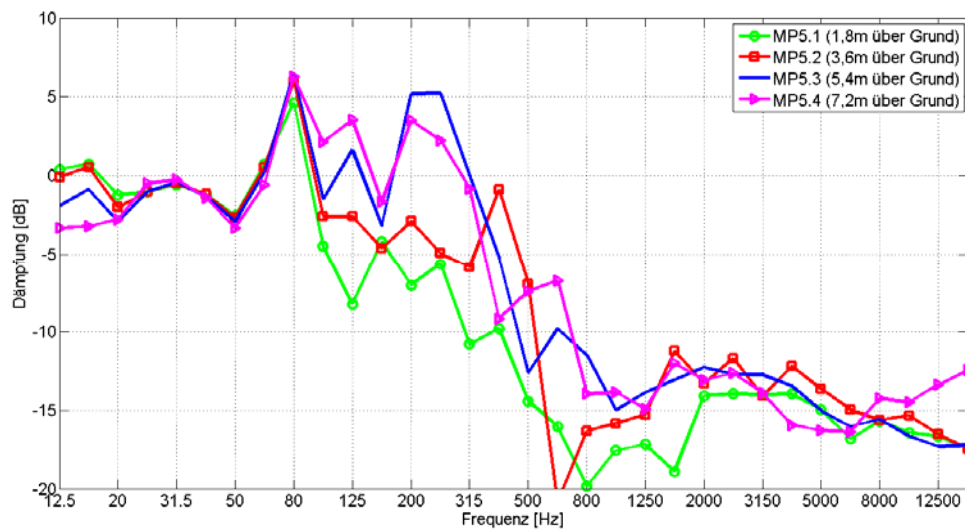


Abbildung 63: Dargestellt ist das Differenzspektrum (spektrale Schalldurchgangsdämpfung) für ein repräsentatives Schallminderungssystem (mit und ohne Schallminderungssystem) gemessen an der Messposition MP5 in unterschiedlichen Höhen (Hydrophonhöhe 1,8 m, 3,6 m, 5,4 m und 7,2 m; Abstand zum Pfahl 13 m).

Es zeigen sich deutliche Unterschiede im Differenzspektrum ohne und mit Schallminderungssystem gemessen an MP5 in unterschiedlichen Höhen von bis zu 10 dB. Im Frequenzbereich $100 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$ zeigt sich, dass mit zunehmender Hydrophonhöhe über Grund die Schalldämpfung geringer wird und zum Teil sogar negative Werte annimmt.

In Anlehnung an Kapitel 8.6.1 werden nachfolgend die Terzspektren mit und ohne Schallminderungsmaßnahme, sowie die dazugehörige frequenz aufgelöste Schalldurchgangsdämpfung für die Messposition MP5.1 (Nahfeld 13 m Entfernung, 1,8 m über Grund) dargestellt. Die resultierenden breitbandigen Reduktionswerte ΔSEL finden sich in der zusammenfassenden Tabelle in Kapitel 8.8.

a) System 1: IHC NMS

Das IHC NMS System wurde einmal mit einem zwischen Testpfahl und IHC NMS System liegenden Blasenschleier und einmal ohne Blasenschleier getestet. Der Blasenschleier wurde mit einem Luftdruck von 7,0 bar kompressorseitig erzeugt.

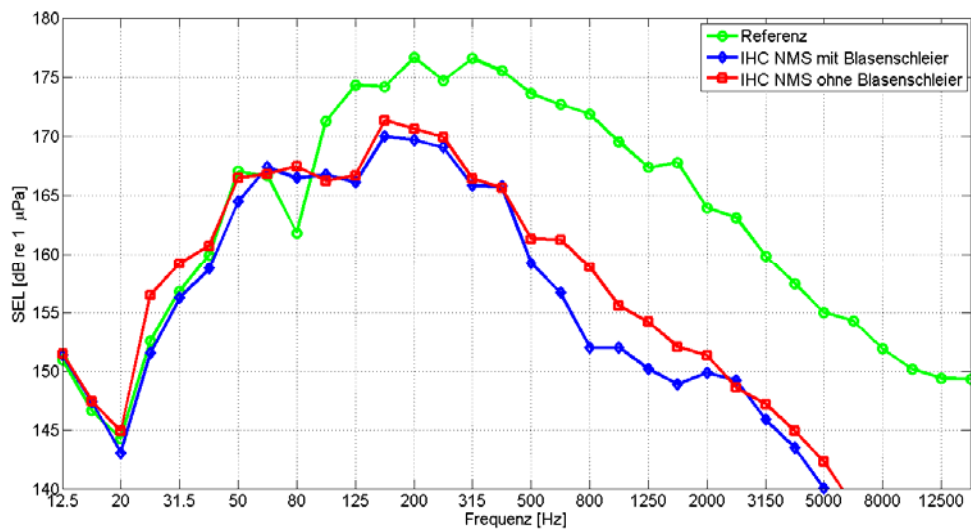


Abbildung 64: Dargestellt sind die der Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssystem für das IHC NMS System mit und ohne innenliegendem Blasenschleier

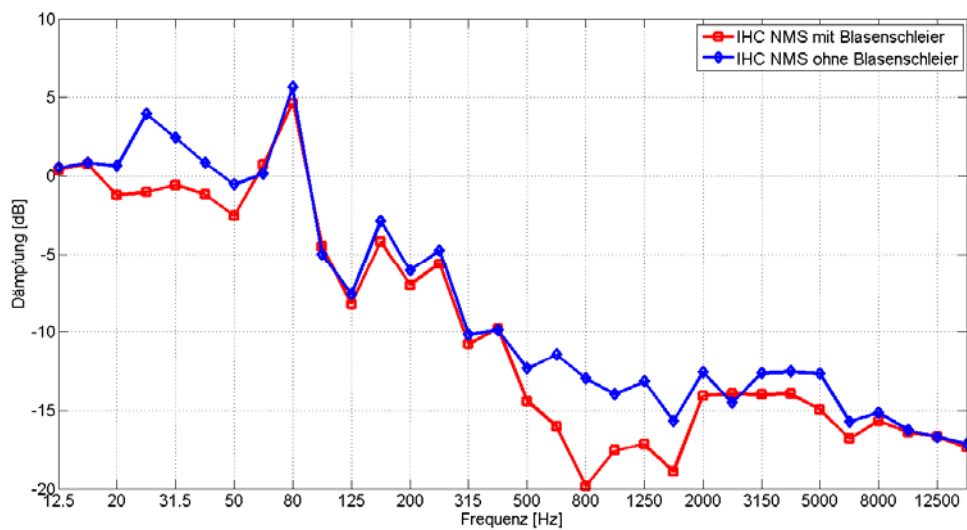


Abbildung 65: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition.

b) System 2: Menck Feuerwehrschauch

Das Schallminderungssystem der Fa. Menck („Feuerwehrschauchmethode“) wurde mit zwei unterschiedlichen konstanten Luftdrücken innerhalb der beiden geschlossenen Feuerwehrschauchringe von 1,0 und 2,0 bar kompressorseitig durchgeführt.

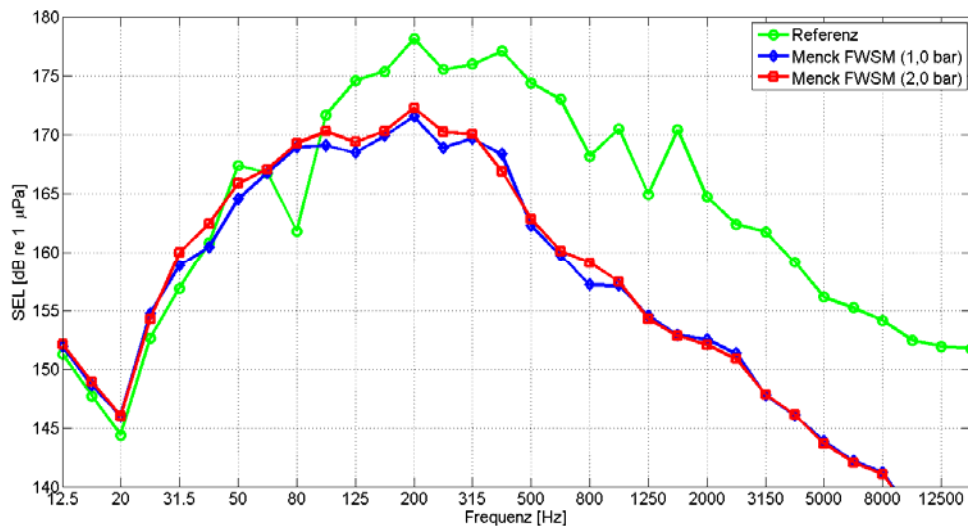


Abbildung 66: Dargestellt sind die Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophonhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssystem für die Feuerwehrschauchmethode der Fa. Menck mit zwei unterschiedlichen Luftdrücken

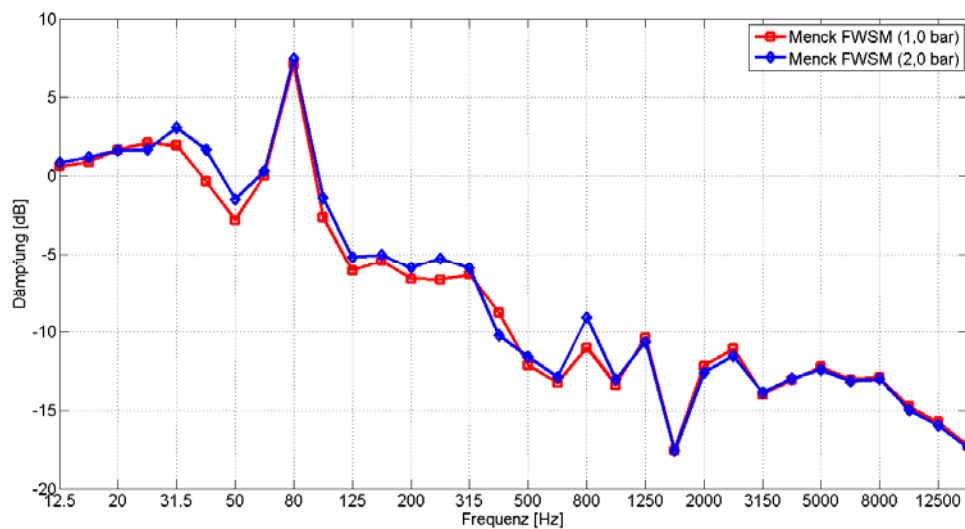


Abbildung 67: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition.

c) System 3: Weyres Little Bubble Curtain

Der LBC wurde mit nur einem Luftdruck getestet (kompressorseitig 7,9 bar).

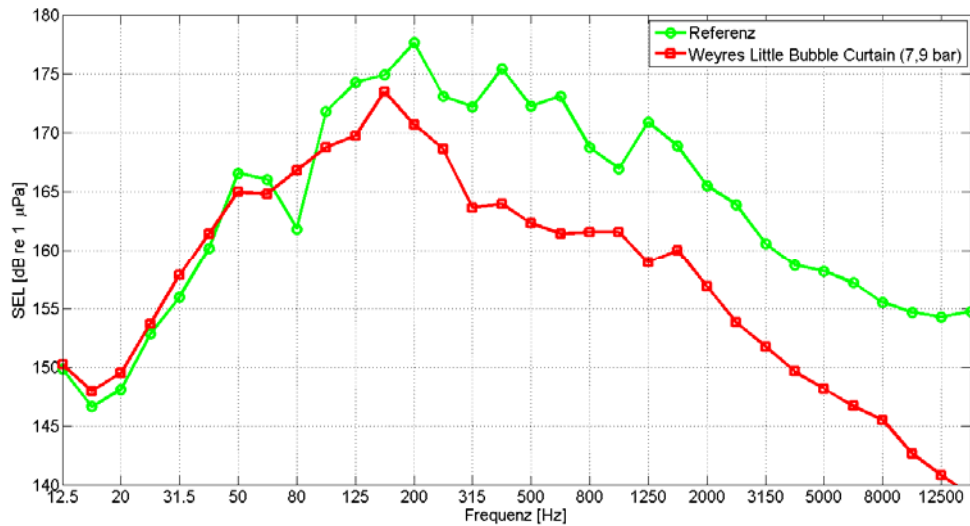


Abbildung 68: Dargestellt sind die Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssysteme für den Little Bubble Curtain der Fa. Weyres

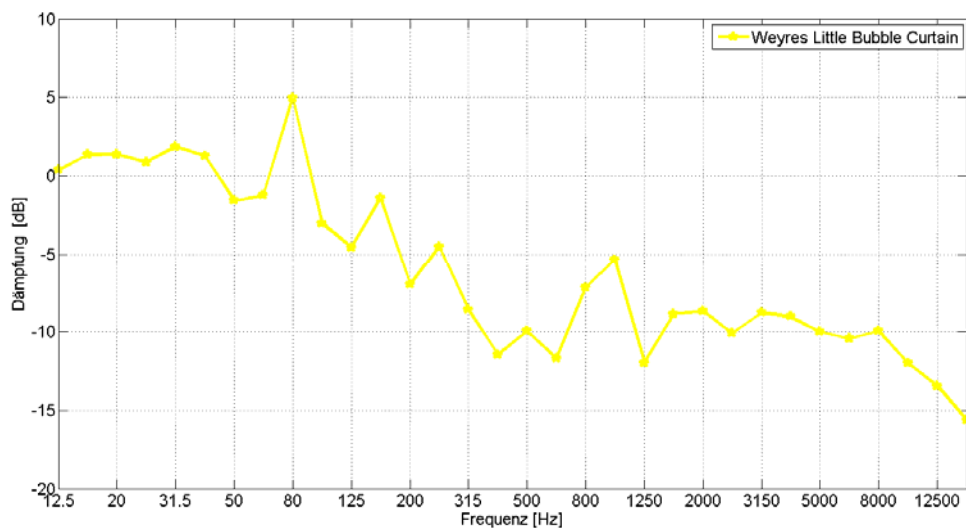


Abbildung 69: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition

d) System 4: BeKa-Schale

Die BeKa-Schale wurde in drei Variationen getestet: i) + ii) mit innenliegendem Blasenschleier mit einem Luftdruck von 2,9 und 7,0 bar kompressorseitig und iii) ohne Blasenschleier. Eine vierte Variation mit dem Auspumpen des Wassers zwischen BeKa-Schale und Testpfahl wurde aus sicherheitstechnischen Gründen nicht durchgeführt.

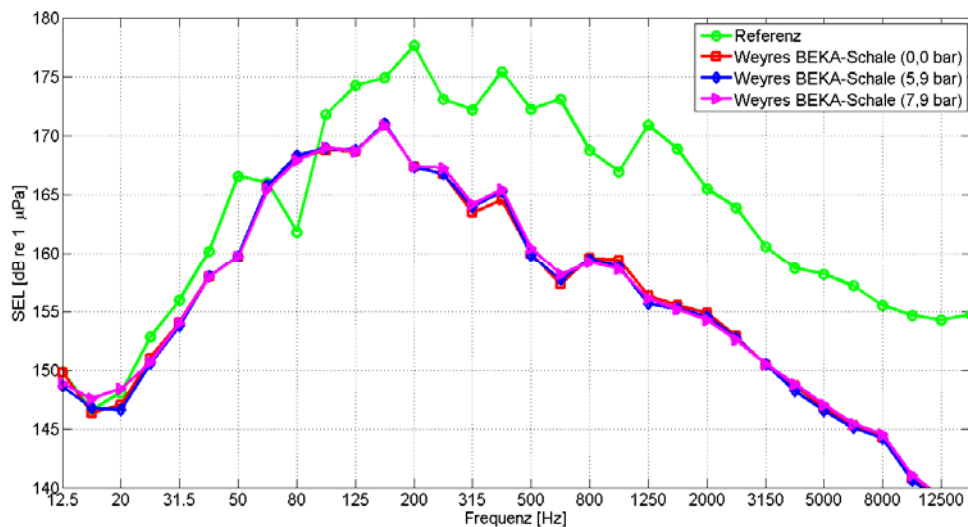


Abbildung 70: Dargestellt sind die Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophonhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssysteme für die BeKa-Schale mit und ohne innenliegendem Blasenschleier der Fa. Weyres

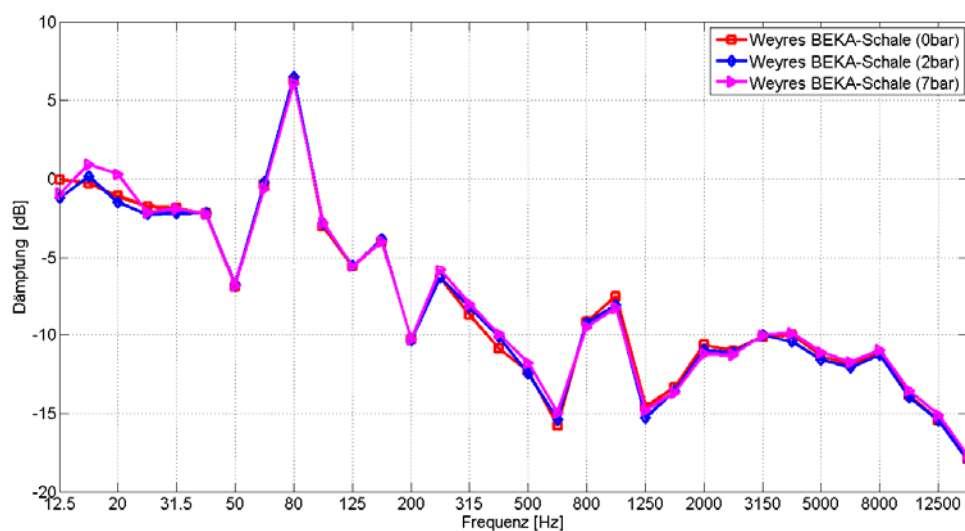


Abbildung 71: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition

e) Elmer Hydro Sound Damper

Der Elmer Hydro Sound Damper verfügte über drei unterschiedliche Ringe (I – innerer Ring; M – mittlerer Ring; A – äußerer Ring), die in allen Permutationen herabgelassen und getestet wurden. Insgesamt ergaben sich sieben Variationsmöglichkeiten.

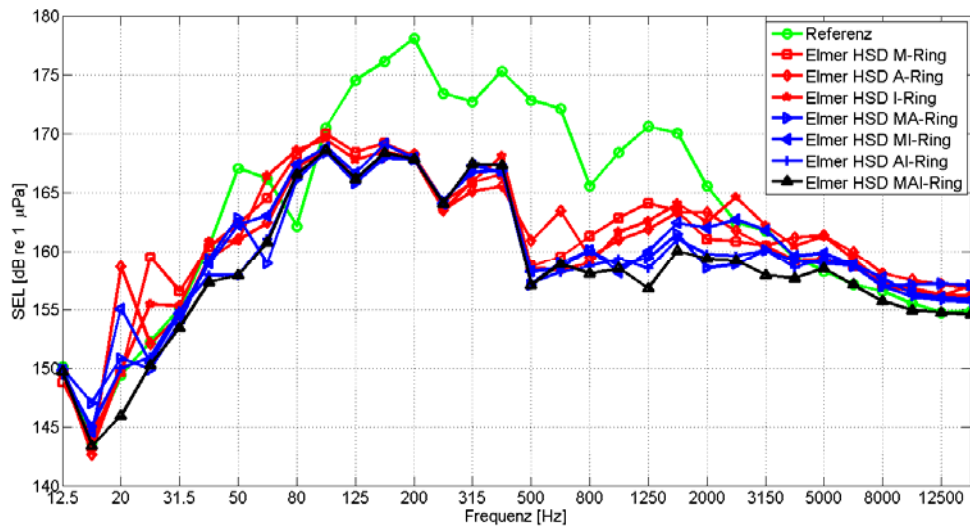


Abbildung 72: Dargestellt sind die Terzspektrern gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssystem des Elmer Hydro Sound Dampers. Durch die (I – innerer Ring; M – mittlerer Ring; A – äußerer Ring) drei Ringe ergaben sich sieben Variationsmöglichkeiten

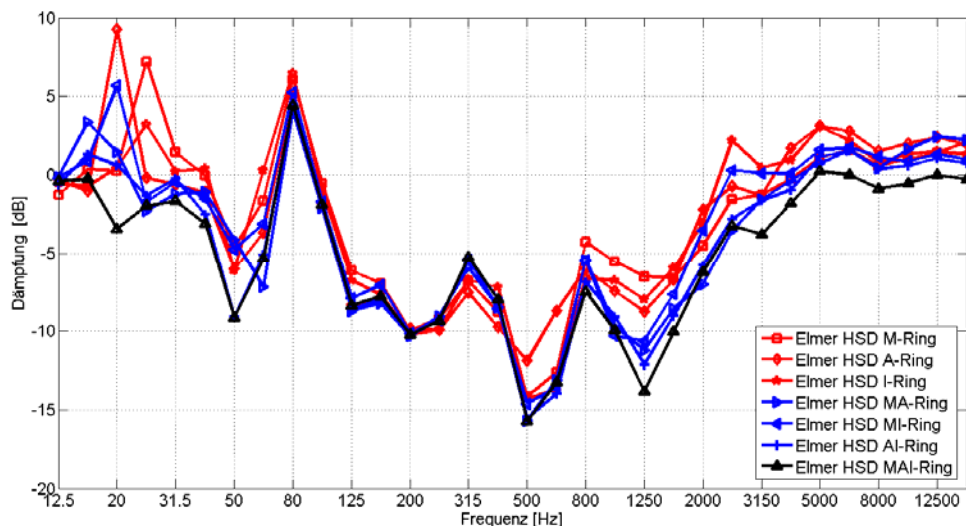


Abbildung 73: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition

8.7 Nahfeldmessungen TU BS (vgl. Appendix 2)

Zusätzlich zu den Messungen der itap GmbH wurden von der TU BS Nahfeldmessungen vom Arbeitsponton durchgeführt. Der komplette Bericht inklusive numerischer Berechnungen ist in Kapitel 15, Appendix 2 nachzulesen.

8.7.1. Eingesetztes Messequipment und Messpositionen

Die Hydroschallmessungen wurden vom IGB-TUBS an allen 4 Messtagen an ähnlicher Position durchgeführt. Das für die Messungen eingesetzte Messsystem wurde von der Firma Bruel & Kjaer hergestellt und besteht für diese Anwendung aus zwei Hydrophonen vom Typ 8103. Diese sind über einen Nexus Signalkonditionierer (Typ 26920S2) mit einem LanXI Modul (3052-B-3/0) verbunden. Die Steuerung dieses Moduls geschieht mit einem Laptop, auf dem sämtliche Messdaten als Schalldruck in Pascal gespeichert werden. Die Abtastrate der Hydrophon betrug 65.536 Hz. Die Messungen wurden an einer Position in ca. sechs Meter Entfernung zum Brodtener Pfahl in unterschiedlichen Tiefen (H1 in 6 m Tiefe, H2 in 4 m Tiefe) durchgeführt (siehe Abbildung 74). Aufgrund der geringen Distanz zwischen dem Brodtener Pfahl und den Hydrophonen können die Messungen als Nahfeldmessungen bezeichnet werden.

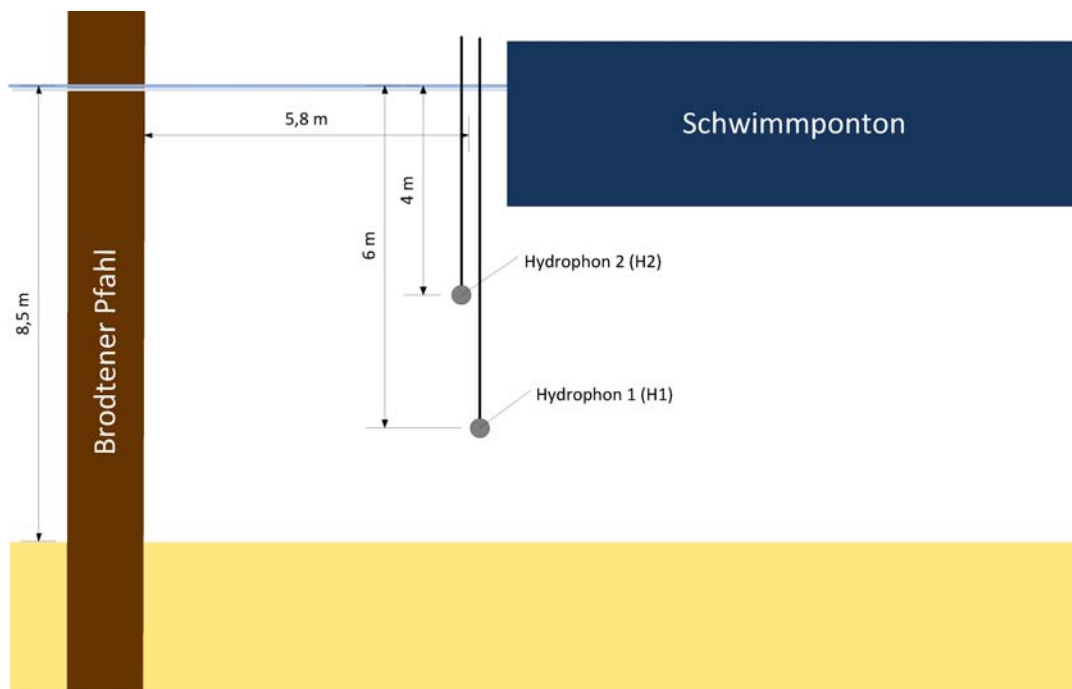


Abbildung 74: Messpositionen und Abstände der IGB-TUBS-Hydrophone am Brodtener Pfahl

8.7.2. Auswertungsprinzip der Hydroschallmessungen

Bei jedem Schallminderungs-System wurde die Schalldämpfungswirkung bei jeweils 3 Schlagserien (100, 200 und 300 kNm Schlagenergie) getestet. Jede Schlagserie bestand aus 20 Einzelschlägen. Die im Folgenden dargestellten Hydroschall-Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Schlagserien mit einer Schlagenergie von 300 kNm, da nur bei dieser Schlagenergie bei allen eingesetzten NMS auch Referenzschläge ohne NMS existieren.

Aus den aufgezeichneten Signalverläufen wurde jeder der 20 Einzelschläge der Schlagserie auf einer Länge von 0,12 Sekunden ausgeschnitten. Beispielhaft sind in Abbildung 75 die Signal-Zeitverläufe der Hydrophone H1 und H2 bei einem Referenzschlag mit 300 kNm Schlagenergie dargestellt, die am Messtag 4 aufgenommen wurden. Es ist deutlich der Schlagimpuls des Hammers nach etwa 4 Millisekunden zu erkennen, der sich als maximal positiver Schalldruck von ca. 120 kPa im Verlauf zeigt. Ein solcher Signalverlauf der Referenzschläge hat sich an allen Messtagen als charakteristisch gezeigt. Des Weiteren ist kein wesentlicher Unterschied zwischen den Hydrophonen H1 und H2 zu erkennen.

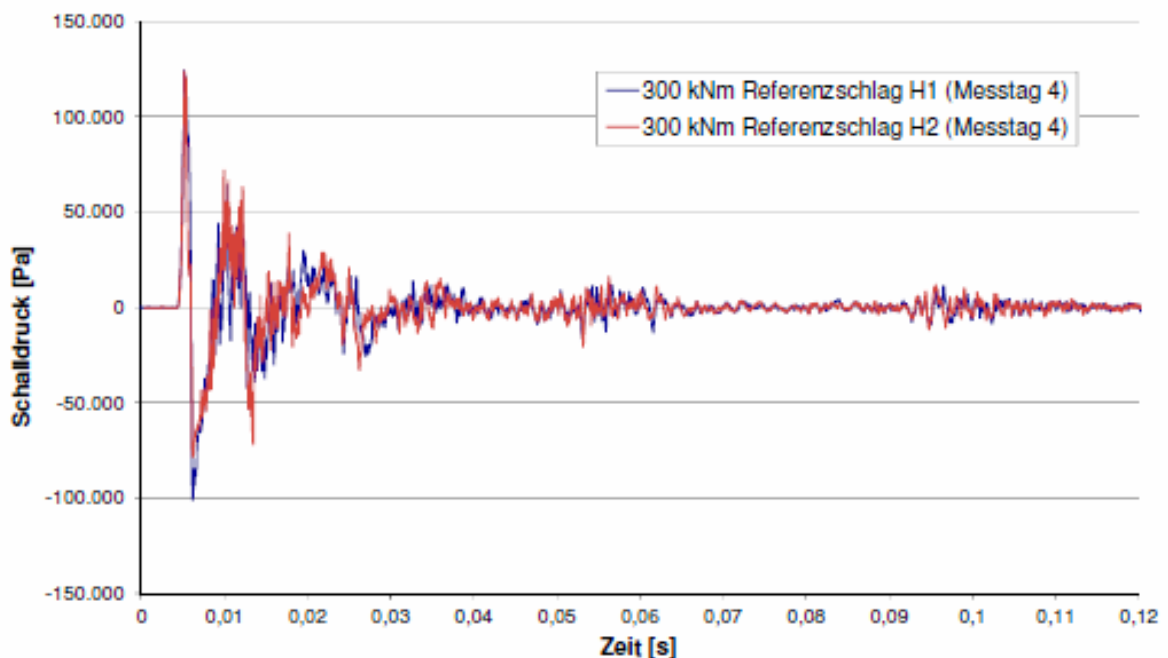


Abbildung 75: Gegenüberstellung der Signal-Zeitverläufe der Hydrophone H1 und H2 bei einem Referenzschlag mit 300 kNm am 4. Messtag

Für jeden Einzelschlag wurde der SEL sowie der L_{Peak} ermittelt. Als Bezugswert p_0 für Wasserschall wurde der festgelegte Wert von $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ (dB re $1 \mu\text{Pa}$) eingesetzt.

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist getrennt für die Hydrophone H1 und H2 in folgender Abbildung für die Referenzschläge am Messtag 4 dargestellt. Es ergibt sich bei beiden Hydrophonen ein SEL von 194 dB und ein L_{Peak} von 222 dB. Dieses Diagramm spiegelt zudem die sehr gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der einzelnen Rammschläge wieder.

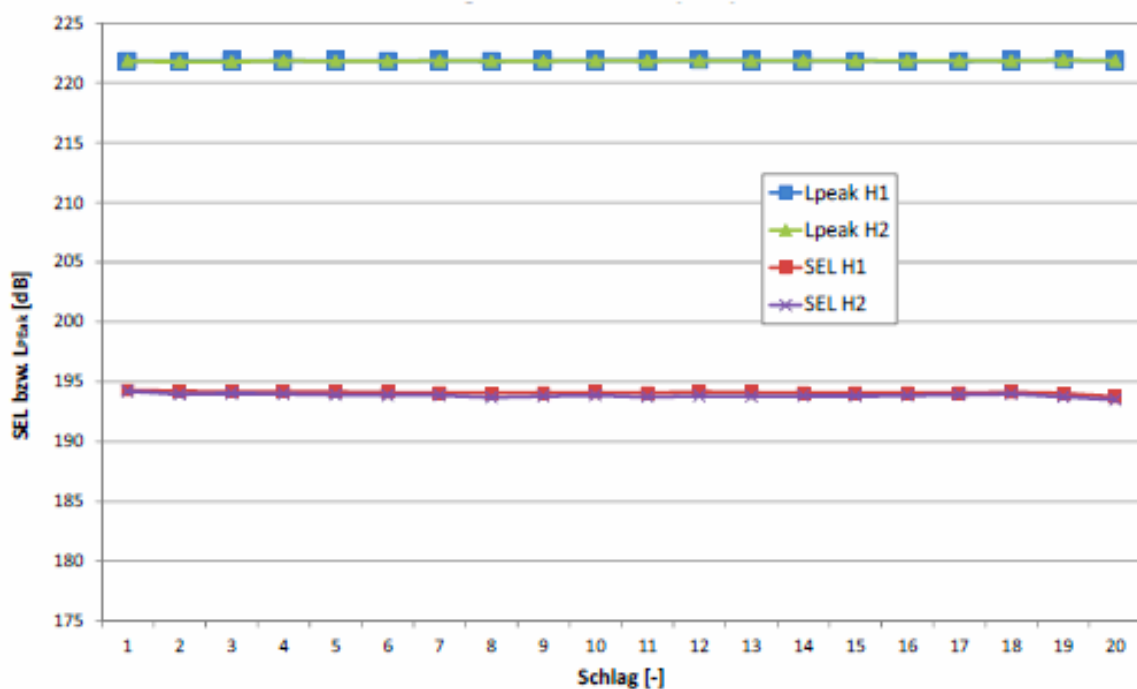


Abbildung 76: ermittelte SEL und L_{peak} für jeden Einzelschlag (H1 und H2) bei den Referenzschlägen am Messtag 4

8.7.3. Ergebnisse der Hydroschallmessungen

Mit der zuvor beschriebenen Pegelbestimmung der Einzelschläge bei einer Schlagenergie von 300 kNm lässt sich eine Bewertung des Dämpfungspotentiales der einzelnen Systeme vornehmen. Diese Auswertung ist in Tabelle 11 zusammengestellt. Aufgeführt sind die gemittelten Lärmpegel des Hydrophons H1, die aus den Einzelschlägen bestimmt wurden. Die Schallreduktion jedes Systems wurde auf die am gleichen Messtag durchgeführte Referenzmessung bezogen.

System	L_{Peak} [dB]	SEL [dB]	Reduktion L_{Peak} [dB]	Reduktion SEL [dB]
Testtag 1				
IHC NMS mit 7 bar	206,0	184,2	13,6	7,6
IHC NMS ohne Druckluft	206,0	184,8	13,6	7,0
IHC Referenz	219,7	191,8		
Testtag 2				
Menck Firehose 1bar	208,3	183,6	13,7	10,9
Menck Firehose 2bar	210,4	184,8	11,6	9,6
Menck Referenz	221,9	194,5		
Testtag 3				
Weyres kl. Blasenschleier	213,1	187,3	8,8	8,0
Weyres BEKA-Schalen 7,9bar	204,8	179,6	17,0	15,7
Weyres BEKA-Schalen 5,0bar	204,2	179,6	17,6	15,7
Weyres BEKA-Schalen ohne DL	204,1	179,3	17,8	15,9
Weyres Referenz	221,8	195,3		
Testtag 4				
HSD Mitte	216,3	186,1	5,6	8,0
HSD Mitte/Außen	213,9	183,3	7,9	10,8
HSD Innen/Mitte/Außen	211,2	180,7	10,7	13,4
HSD Innen/Außen	214,5	182,3	7,4	11,8
HSD Außen	216,0	184,7	5,9	9,5
HSD Innen	216,2	185,1	5,7	9,0
HSD Innen/Mitte	216,0	184,1	5,8	10,0
HSD Referenz	221,8	194,1		

Tabelle 11: Gesamtergebnis der IGB-TUBS-Hydroschallmessungen im Nahfeld (Abstand = 6,0 m) bei einer Schlagenergie von 300 kNm

Die Pegel der Referenzmessungen sind bei den Systemen Menck, Weyres und HSD (Messtage 2-4) annähernd identisch (ca. 222 dB). Nur beim IHC-System wurde ein um 2 dB geringerer Pegel gemessen. Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich ebenso bei der Auswertung der Terzanalyse der Referenzschläge (Abbildung 77). Auch dabei zeigt sich, dass der SEL in den einzelnen Terzen an den Messtagen 2 bis 4 sehr gut übereinstimmt.

Die Schallreduktion der einzelnen Systeme beträgt in 6 m Entfernung vom Pfahl zwischen 7,0 dB und 15,9 dB SEL.

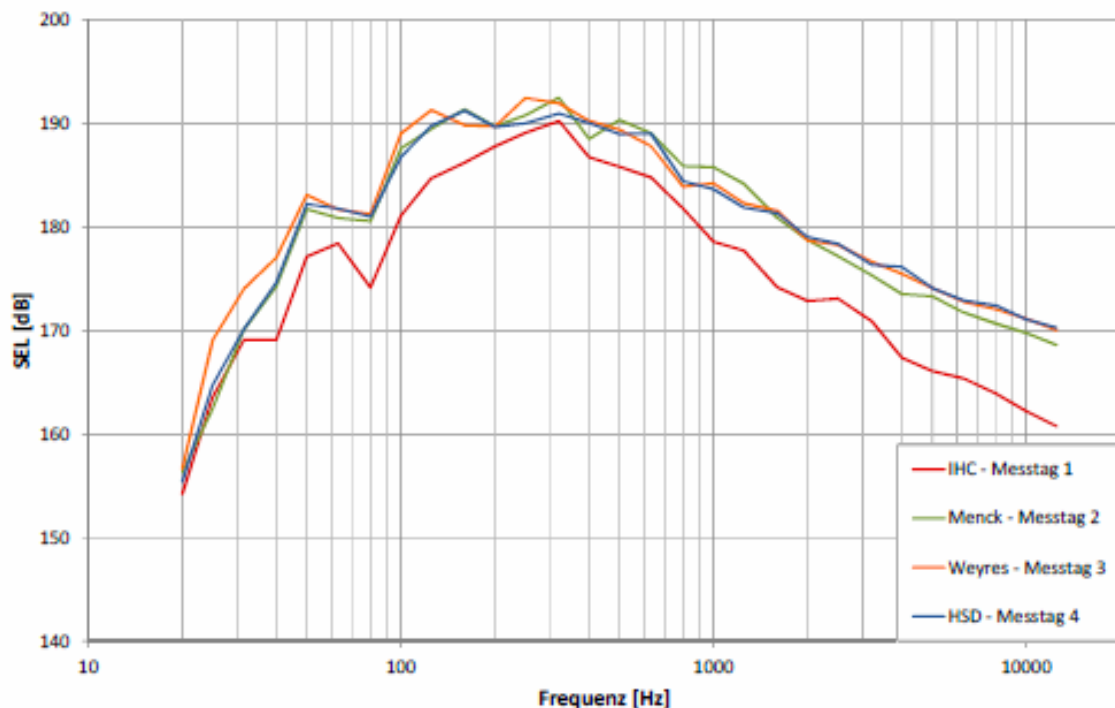


Abbildung 77: Terzanalyse der Referenzschläge an den 4 Messtagen

In den folgenden Abbildung 78 bis Abbildung 81 sind die Terzanalysen bei Anwendung der einzelnen Schallminderungssysteme im Vergleich zur jeweiligen Referenzmessung (ohne System) dargestellt. Der weiß hinterlegte Bereich markiert dabei die erzeugte Schallminderung bezogen auf die Terz. Bei den Systemen von IHC und Menck ergeben sich maximale Reduktionen von 20 dB bzw. 18 dB, bei den Bekaschalen von Weyres 24 dB und beim System der Hydroschalldämpfer (HSD) 23 dB.

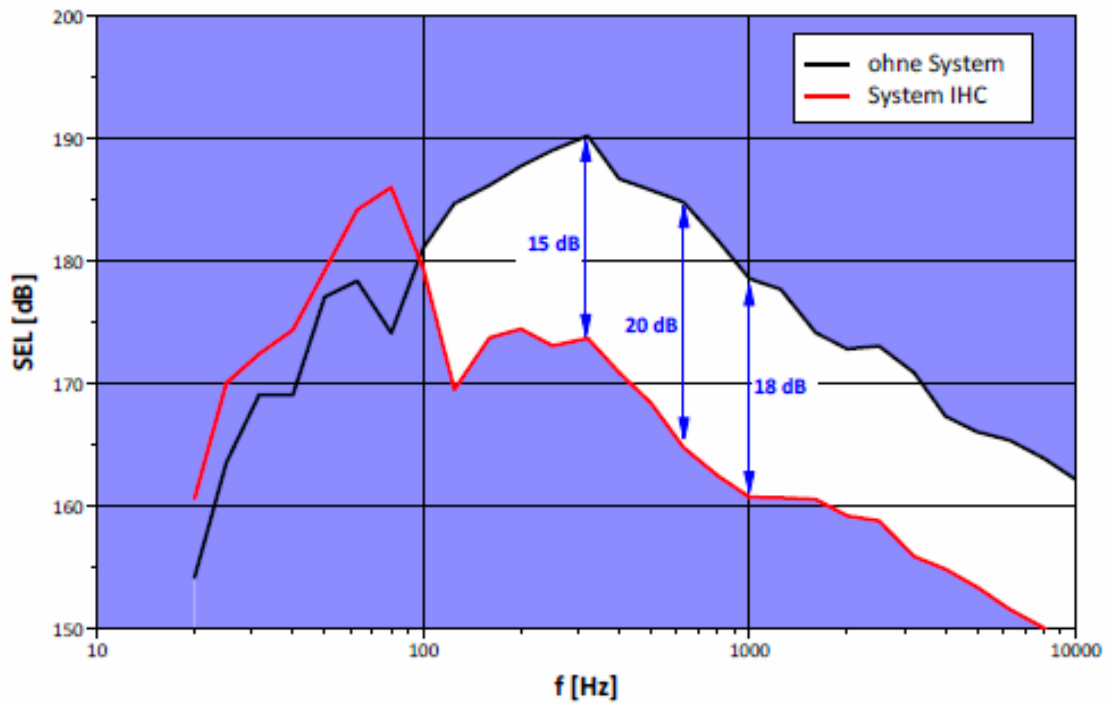


Abbildung 78: Terzanalysen beim Einsatz des IHC-Systems (7 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 1)

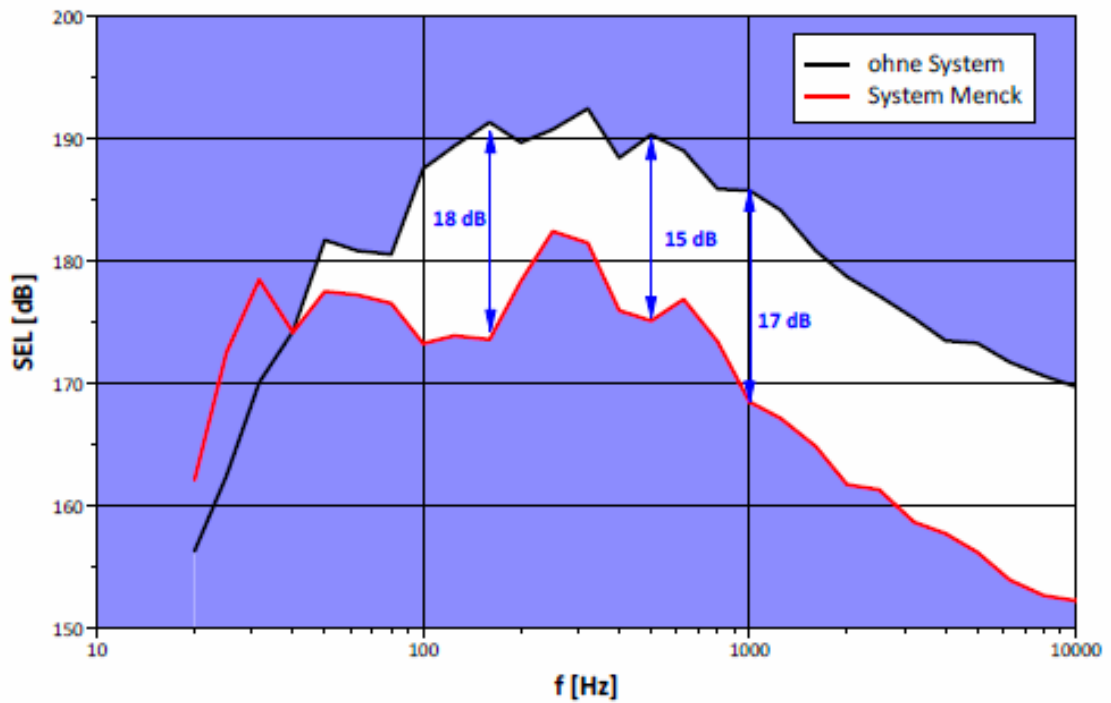


Abbildung 79: Terzanalysen beim Einsatz des Menck-Systems (firehose, 1 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 2)

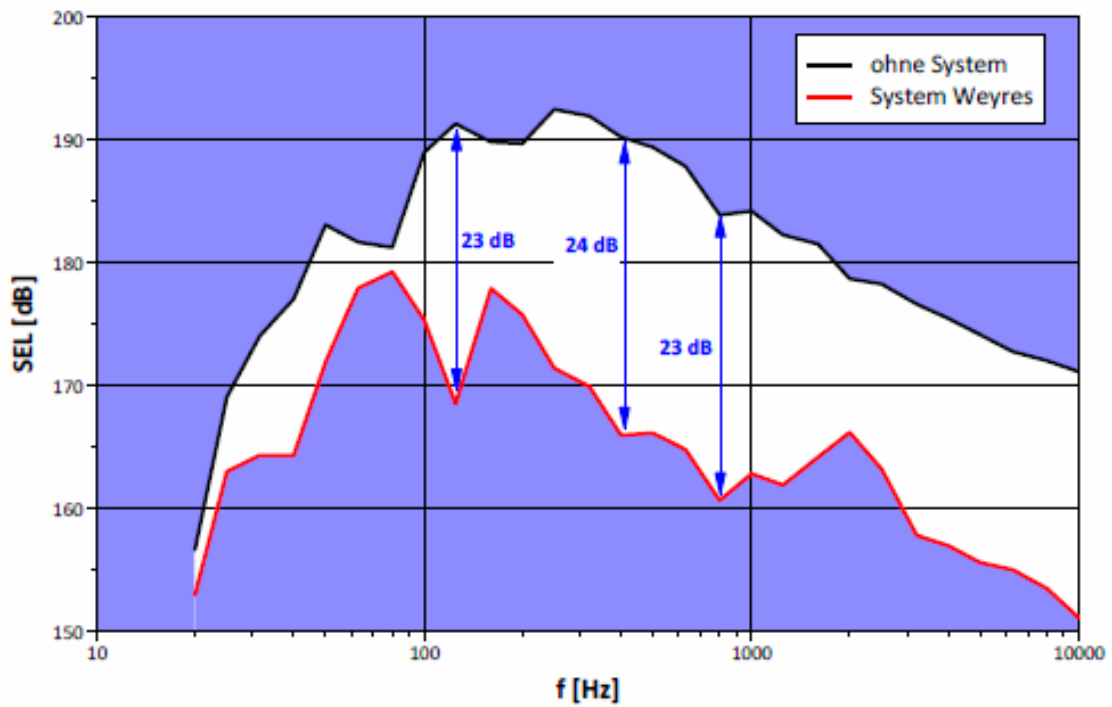


Abbildung 80: Terzanalysen beim Einsatz des Weyres-Systems (BeKa-Schale, 0 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 3)

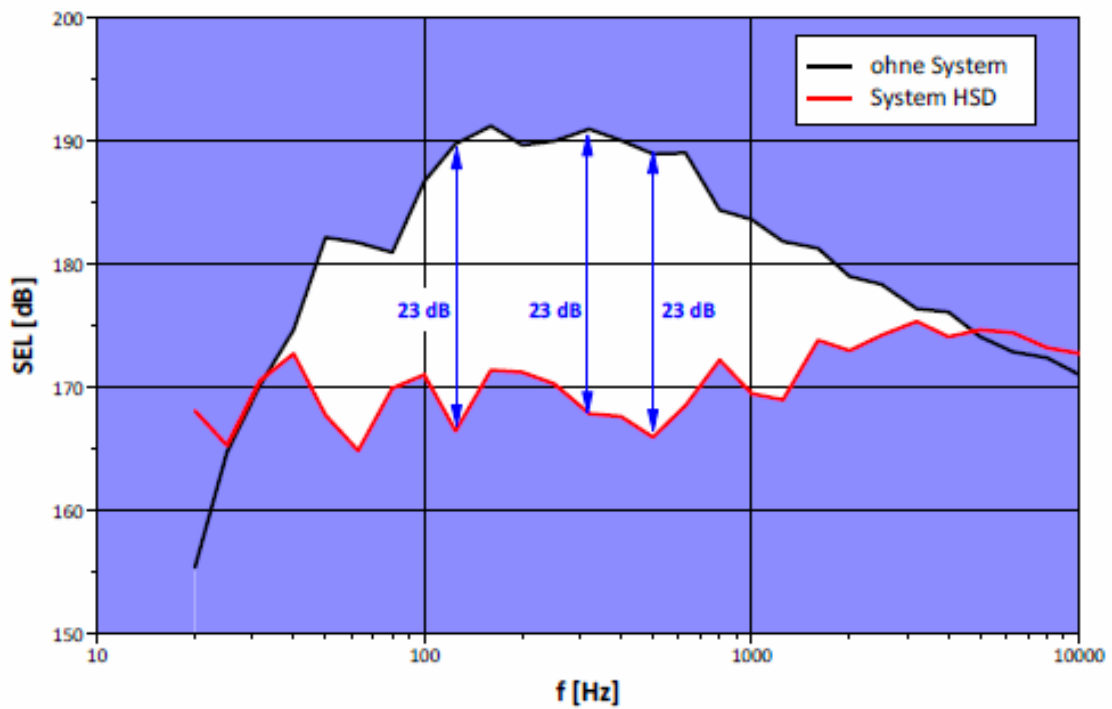


Abbildung 81: Terzanalysen beim Einsatz des HSD-Systems (3 Netze) und der Referenzmessung ohne Schallschutz

8.8 Vergleich von Fernfeld- und Nahfeldmessungen

Die im Projekt ESRa durchgeführten Nah- und Fernfeldmessungen des Hydroschalls während der Rammungen mit und ohne Schallminderungssysteme am ergeben zum Teil erhebliche Unterschiede in der Schalldurchgangsdämpfung (Differenz im Einzelereignispegel ohne und mit Schallminderungsmaßnahme – Δ SEL) gemessen im Nah- und Fernfeld. Im Fernfeld (Abstand 375 m bis 750 m) ergeben sich je nach eingesetztem Schallminderungssystem zwischen 4,2 dB und 6,1 dB. Im Gegensatz dazu ergeben sich je nach Entfernung zum Pfahl Werte für die Schalldurchgangsdämpfung von 5,4 dB bis 7,6 dB (Abstand 13 m) bzw. 7,0 dB bis 15,9 dB (Abstand 6,0 m) im Nahfeld. In Tabelle 12 sind die gemessenen Schalldurchgangsdämpfungen für jedes Schallminderungssystem in Abhängigkeit der Entfernung zum Pfahl zusammengefasst. Es zeigt sich, dass mit Verringerung des Abstands zwischen Messposition und Pfahl die Schalldurchgangsdämpfung erheblich zunimmt. Der Grund für die Zunahme der Dämpfung ist derzeit nicht eindeutig erklärbar. Aus wissenschaftlicher Sicht ist dieser Umstand höchst interessant. Mögliche Erklärungsansätze der Projektpartner gehen in zwei Richtungen:

- (1) mit abnehmendem Abstand zum Pfahl verringert sich der Einfluss einer Bodenkopplung bzw. Schallabstrahlung aus dem Sediment ins Wasser und
- (2) für akustische Messungen im Nahfeld ist nicht alleine die Kenntnis des Schalldrucks p sondern auch der Schallschnelle v notwendig, da die akustische Leistung im Nahfeld sich in einen Wirk- und Blindanteil aufteilt. Somit sind Schalldruckmessungen im Nahfeld mit hohe Messunsicherheiten behaftet.

Beide Ansätze sind von den Projektpartnern kontrovers diskutiert worden. Abschließend geklärt werden konnten die auftretenden Phänomene nicht. Es lässt sich jedoch festhalten, dass die Schallabstrahlung eines zu rammenden Pfahls hochgradig nicht-trivial ist und zur Klärung obigen Verhaltens weitere Grundlagenforschung erforderlich ist.

Nr	System	Schallschutzsystem	Δ SEL [dB]		
			Differenz ohne/mit Schallminderungssystem		
			Nahfeld		Fernfeld
			Abstand 6 m	Abstand 13 m	Abstand 375 – 750 m
1	1	IHC NMS mit Blasenschleier	7,6	7,3	5,6
2		IHC NMS ohne Blasenschleier	7,0	6,4	5,1
3	2	Menck FWSM mit 1,0 bar	10,9	6,4	5,0
4		Menck FWSM mit 2,0 bar	9,6	5,8	4,4
5	3	Weyres LBC	8,0	5,4	4,2
6	4	Weyres BeKa 0 bar	15,9	6,9	5,9
7		Weyres BeKa 5 bar	15,7	6,8	5,9
8		Weyres BeKa 7 bar	15,7	6,8	6,1
9	5	Elmer HSD M Ring	8,0	6,2	5,0
10		Elmer HSD A Ring	9,5	6,9	4,2
11		Elmer HSD I Ring	9,0	6,2	5,4
12		Elmer HSD MA Ring	10,8	7,5	5,4
13		Elmer HSD MI Ring	10,0	6,8	4,9
14		Elmer HSD AI Ring	11,8	7,4	5,4
15		Elmer HSD MAI Ring	13,8	7,6	5,4

Tabelle 12: Zusammenfassung der Schallminderungspotenziale (Δ SEL) der getesteten fünf Schallminderungssysteme inkl. Variationen als Funktion des Abstands zwischen Pfahl und Messposition. Die Messungen im Fernfeld werden für Δ SEL Medianwerte über vier Messpositionen im Abstand zwischen 375 m und 750 m verwendet, im Nahfeld Einzelergebnisse

8.9 Messunsicherheiten und Toleranzen

Die verwendeten Hydrophone und das verwendete Geophon besitzen eine hohe Reproduzierbarkeit von $\leq \pm 1$ dB. In der Regel ist jedoch bei Feldmessungen im Offshore-Bereich, auch bei ruhiger See, unsystematische Messunsicherheit bei Wiederholungsmessungen im Bereich von ≥ 2 dB zu erwarten.

Die in diesem Kapitel dargestellten Messergebnisse sind als konservative Betrachtungen der Schallminderungspotenziale der einzelnen Systeme anzusehen. Durch die vom itap durchgeführte Medianbildung über bis zu vier Messpositionen im Fernfeld werden „Ausreißer“ in der Schallreduktion (Schalldurchgangsdämpfung), die ggfs. durch äußere Randbedingungen bedingt sind, in positiver und negativer Richtung weniger stark gewertet.

9. Diskussion der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen aus Kapitel 8 ergeben sich folgende drei offene Punkte, die in der nachfolgenden Diskussion behandelt werden sollen:

1. Vergleich zwischen dem *Brodtener Pfahl* (Standort für ESRa) und anderen Projektstandorten
2. Stand der Wissenschaft im Bereich Schallminderungskonzepte bzw. Schallminderungssysteme
3. Wie lassen sich die getesteten Schallminderungssysteme aus ESRa verbessern?

Der erste Punkt zielt darauf ab, zu klären, ob der *Brodtener Pfahl* aufgrund seiner Randbedingungen grundsätzlich für einen Ringversuch von Schallminderungsmaßnahmen geeignet ist oder nicht. Im zweiten Abschnitt (Kapitel 9.2) werden die Schallminderungspotenziale der getesteten Systeme aus ESRa mit denen aus der Literatur verglichen. Im letzten Abschnitt (Kapitel 9.3) werden Hypothesen aus wissenschaftlicher Sicht generiert, wie man die bestehenden Systeme für zukünftige Einsätze verbessern könnte.

9.1 Vergleich zwischen dem Brodtener Pfahl (Standort für ESRa) und anderen Projektstandorten

9.1.1. Randbedingungen Brodtener Pfahl

Der Brodtener Pfahl besitzt eine Gesamtlänge von ca. 78 m, davon sind 65,0 m im Sediment (Einbindelänge), 8,5 m in der Wassersäule und ca. 5,5 m ragt der Pfahl aus dem Wasser. Diese Verhältnisse sind i. d. R. ungewöhnlich. Zusätzlich ist der Pfahl mit dem Sediment fest verwachsen, sodass bei weiteren Rammarbeiten kein weiterer Vortrieb des Pfahles zu erwarten ist.

Die Wassertiefe im Umkreis von 1 km Entfernung um den Pfahl beträgt zwischen 5,4 m und 11,4 m, sodass man von einem sehr flachen ufernahen Gewässer ausgehen muss.

In der Abbildung 82 sind die Terzspektren von Rammarbeiten bei der Herstellung der Windenergie-Offshore Parks alpha ventus (Nordsee) [5], Baltic II (Ostsee) [25] im Vergleich zu Messdaten am Testpfahl *Brodter Pfahl* im Fernfeld (mehrere 100 Meter Entfernung) dargestellt. Die dünnen Linien stellen jeweils Einzelmessungen dar, die dazugehörige breitere Linie stellt den Median aus den Einzelmessungen dar. Bei den dargestellten Messungen waren die Randbedingungen komplett unterschiedlich, d. h. unterschiedliche Pfahllängen, Pfahldicken (Wandstärke), Schlagenergien, Wassertiefen, etc.

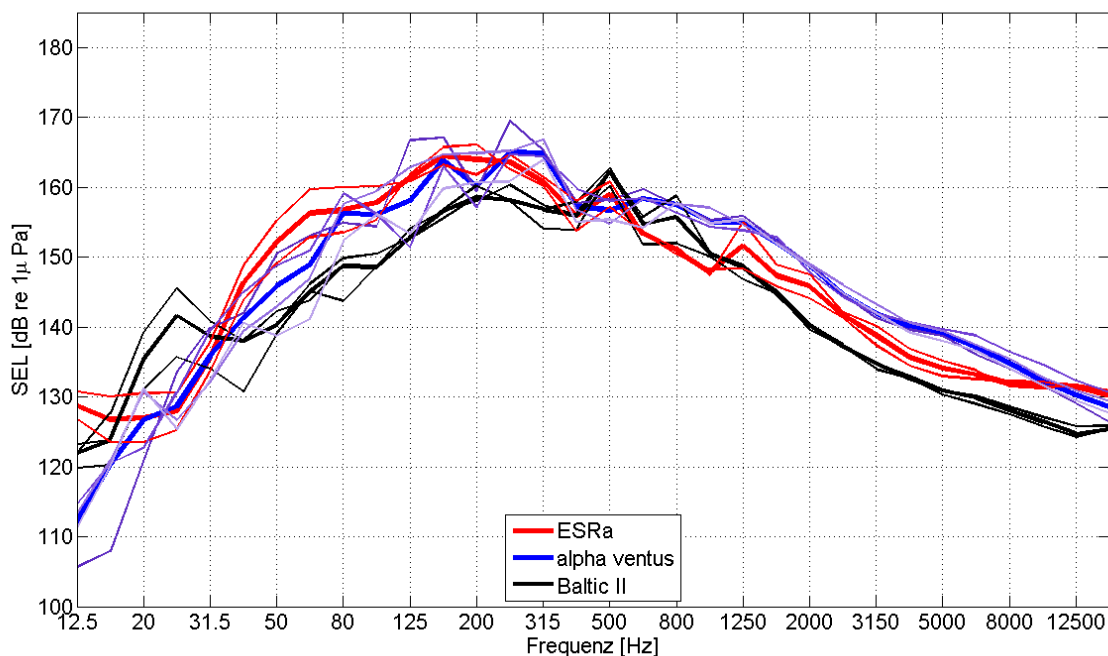


Abbildung 82: Dargestellt sind die Terzspektren in Entfernungen zwischen 500 m und 1.000 m Entfernung zum jeweiligen Pfahl während unterschiedlicher Rammarbeiten. Die dünnen farbigen Linien stellen jeweils Einzelmessungen dar, die dicken farbigen Linien kennzeichnen die Medianwerte.

In Abbildung 83 ist ein aus mehreren Messungen von der itap GmbH gemitteltetes Terzspektrum (Modellspektrum) im Fernfeld, welches zu Prognosezwecken verwendet wird, dargestellt.

Im Frequenzbereich zwischen 100 und 500 Hz befindet sich die meiste Energie während der Rammungen im Fernfeld (ca. 750 m). Es zeigen sich keinerlei größere Un-

terschiede in den Terzspektren bei den in Abbildung 82 dargestellten Rammspektren untereinander und zum Modellspektrum aus Abbildung 83.

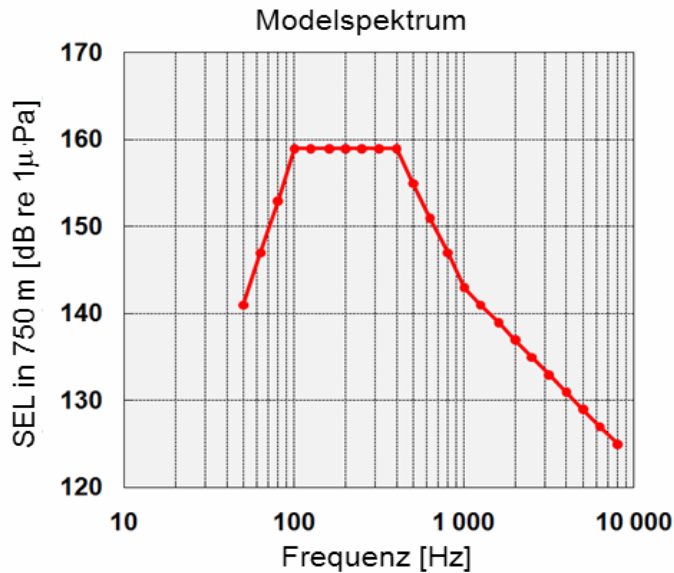


Abbildung 83: *Modellspektrum für einen Rammschlag im Fernfeld für Prognosezwecke. Das idealisierte Modellspektrum basiert auf mehreren Messungen bei diversen Rammaktivitäten der itap GmbH*

9.1.2. Bodenkopplung („Preblow“)

In der Abbildung 84 ist das Zeitsignal von jeweils einem Rammschallimpuls mit und ohne ein Schallminderungssystem in einem Abstand von 750 m Entfernung (MP1.1) dargestellt.

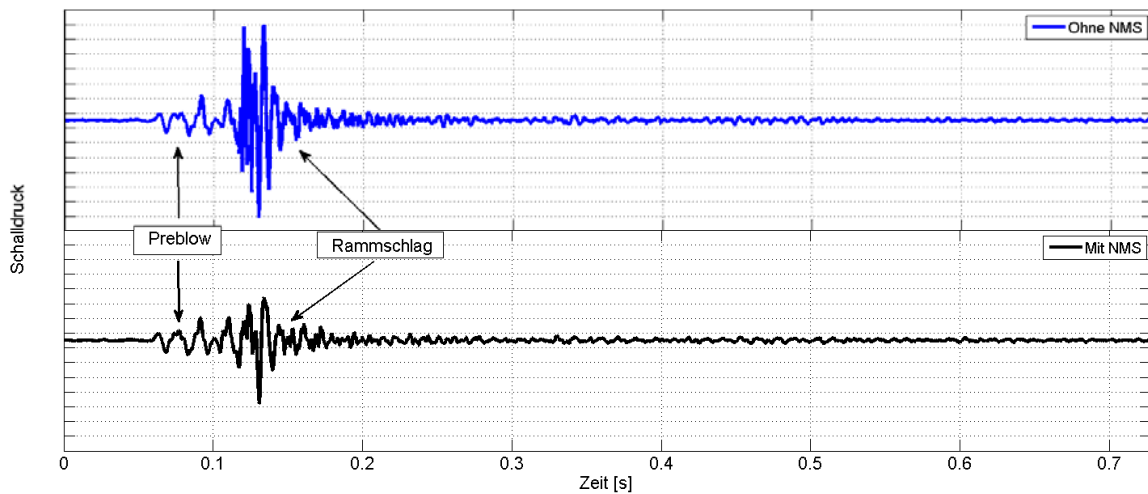


Abbildung 84: Zeitfunktion (Zeitsignale) eines Hydroschall-Rammimpulses in 750 m Abstand vom Testpfahl und in 1,8 m Entfernung zum Sediment bei einer verwendeten Rammenergie von 300 kJ.

Nach ca. 0,125 s zeigt sich im oberen Bild (ohne Schallminderungsmaßnahme), dass der rein über das Wasser ankommende Schallanteil (Rammschlag) impulsförmig am Hydrophon anliegt. Zusätzlich existiert eine zweite Komponente, die nahezu sinusförmig (um 70 – 80 Hz) ist und ca. 0,05 s vor dem „eigentlichen“ Rammschlag am Hydrophon ankommt.

In der Literatur [z. B. [9]] wurde bisher vermutet, dass diese Komponente auf Erschütterungen im Sediment durch den Rammschlag am Pfahl produziert wird. Die Erschütterungen des Sediments koppeln ebenfalls an das Wasser an. Da die Schallgeschwindigkeit v des Pfahls (Stahl, c zwischen 2.000 und 5.000 m/s²) und des Sediments (c zwischen 1.600 und 2.000 m/s²) höher als die Schallgeschwindigkeit im Wasser ist ($c \sim 1.500$ m/s²), erreicht diese Komponente die Hydrophone im „Fernfeld“ schneller als der reine Wasserschallanteil (Rammschlag). Dieses Phänomen wird oftmals als „Preblow“ bezeichnet und kennzeichnet die Bodenkopplung zwischen dem Pfahl und dem Sediment. Diesen Effekt beobachtet man bei allen Rammarbeiten in der Nord- und Ostsee [9]. Jedoch beträgt die Amplitude des „Preblows“ in der Regel bei Pfählen, die noch Vortrieb haben, nur ca. 1/10 der Amplitude des reinen Rammschlages. Im vorliegenden Fall beträgt der Faktor ohne Schallminderungsmaßnahme nur ca. 2,5 bis 3, d. h. die „seismische“ Komponente ist

beim vorliegenden Pfahl besonders stark ausgeprägt. Dieses Ergebnis ist ebenfalls bei Messung an dem *Brodteener Pfahl* im Jahr 2006 gemessen worden [9].

Im unteren Bild von Abbildung 84 ist die Zeitfunktion mit einem Schallminderungssystem dargestellt. Der zeitliche Verlauf des Rammimpulses ähnelt dem der Referenzkondition (ohne Schallminderungssystem). Jedoch zeigt sich, dass der reine Hydroschallanteil durch das Schallminderungssystem erheblich in der Amplitude reduziert wird. Im Gegensatz dazu bleibt die „seismische“ Komponente (Bodenkopplung bzw. „Preblow“) nahezu gleich.

In der Abbildung 85 ist das Zeitsignal des Geophons (Erschütterungen des Sediments) an der Messposition MP5.5 (13 m Abstand zum Pfahl) dargestellt.

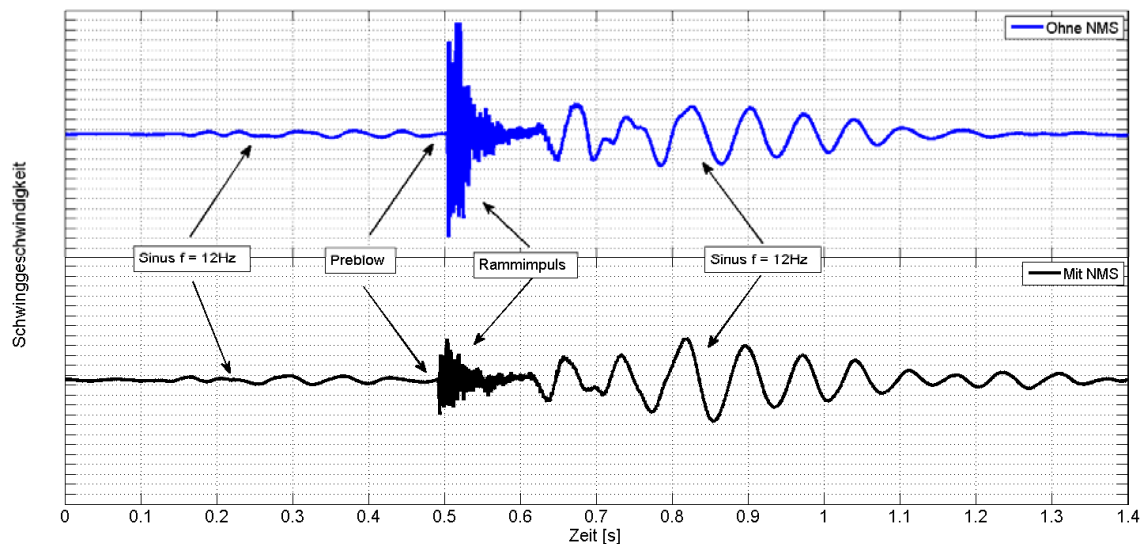


Abbildung 85: Zeitfunktion (Zeitsignale) des Geophons (Erschütterung) eines Rammimpulses in 13 m Abstand vom Testpfahl am Sediment bei einer verwendeten Rammenergie von 300 kJ.

Im Vergleich von Abbildung 84 (Hydroschall im Fernfeld) und Abbildung 85 (Erschütterung des Sediments im Nahfeld) zeigt sich, dass das Erschütterungszeitsignal deutlich länger ist. Zu Beginn und am Ende des Zeitsignals eines Rammschlages zeigen sich nahezu sinusförmige langanhaltende Schwingungen mit einer Frequenz um die 12 Hz bei der Sedimentschwingung. Der „eigentliche“ Rammimpuls ist in etwa vergleichbar mit dem des Hydroschallsignals. Es wird vermutet, dass die sinusförmigen

ge 12 Hz Schwingung eine Eigenmode des Pfahls ist, die beim Rammschlag sich Richtung Sediment fortpflanzt (erste Sinusschwingung vor dem eigentlichen Rammimpuls) und am Ende des Pfahls reflektiert wird (zweite Sinusschwingung nach dem eigentlichen Rammimpuls).

In den Ergebnissen der Schallreduktionspotenziale aller getesteten Schallminderungsmaßnahmen in dieser Untersuchung (Kapitel 8.6) ergeben sich negative Dämpfungen durch die Schallminderungssysteme im Bereich $63 < f < 100$ Hz. Dieser Effekt ist auf die Bodenkopplung, d. h. die Schallabstrahlung vom Sediment ins Wasser, zurückzuführen. Wie bereits Untersuchungen aus dem Jahr 2006 [9] zeigten, ist die Bodenkopplung am Brodtener Pfahl besonders stark. Dies resultiert vermutlich aus der großen Eindringtiefe des Pfahles und der Tatsache, dass der Pfahl mit dem Sediment verwachsen ist. Einen weiteren Einfluss auf die erhöhte Schallabstrahlung über den Boden könnte die zusätzliche Kompression des Sediments um den Pfahl durch die statischen Massen der installierten Schallminderungsmaßnahmen sein. In Abbildung 86 ist daher die Differenz zwischen den Terzspektren ohne und mit Schallminderungsmaßnahme der Schwinggeschwindigkeit für jeden der vier Versuchstage dargestellt. Es zeigt sich, dass an den ersten drei Tagen die Sedimentschwingungen im Frequenzbereich $63 < f < 100$ Hz ebenfalls eine Erhöhung von bis zu 5 dB mit Schallminderungsmaßnahme aufweisen. Diese Erhöhung mit sehr ähnlicher Amplitude findet sich auch in den Differenzspektren der Unterwasserschallmessungen für die getesteten Messsysteme der ersten drei Tage (IHC NMS, Menck FWSM und Weyres BeKa-Schale) wieder, Abbildung 61. Sämtliche getesteten Systeme tragen eine nicht unerhebliche statische Last auf das Sediment um den Pfahl ein. Für den vierten Messtag hingegen ergab sich eine Differenz in der Schwinggeschwindigkeit ohne und mit Schallminderungsmaßnahme von bis zu -12 dB. Das getestete System war das Elmer HSD System, welches deutlich geringere statische Masse als die übrigen Systeme aufweist. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich auch für den Weyres LBC, der ebenfalls eine geringere Masse als die anderen Systeme aufweist. Sowohl beim Elmer HSD System als auch beim Weyres LBC sind die Differenzen zwischen ohne und mit Schallschutzmaßnahmen beim Unterwasserschall (Abbildung 61) ebenfalls geringer als bei den übrigen Systemen. Es lässt sich daraus schlussfolgern, dass die statische Masse des verwendeten Schallminderungssystems und die damit verbundene statische Kraffteinleitung ins Sediment einen Einfluss

auf die Bodenkopplung bzw. Bodenabstrahlung haben können. Ähnliche Ergebnisse sind bei der Verwendung eines Stahlrohres als Schallminderungsmaßnahme bei den Untersuchungen aus dem Jahre 2006 [9] zu beobachten.

Somit ist zu vermuten, dass die starke Bodenkopplung bei den vorliegenden Untersuchungen durch die große Eindringtiefe des Pfahles inkl. Verwachsung und die statische Vorbelastung der verwendeten Schallminderungssysteme verursacht wird.

Es lässt sich somit vermuten, dass die Bodenkopplung am Brodtener Pfahl deutlich stärker ausgeprägt ist, als bei Pfählen, die in tieferes Gewässer mit Vortrieb gerammt werden. In Tabelle 13 sind aus diesem Grund die Schallminderungspotenziale im breitbandigen Einzelereignispegel der Hydroschallmessungen im Fernfeld (Tabelle 10 in Kapitel 8.6.1) mit den Schallminderungspotenzialen gemessen im Nahfeld (MP5.1; Kapitel 8.6.2) gegenübergestellt. Da die Bodenkopplung tieffrequent ist, sind zusätzlich die Schallminderungspotenziale im Fernfeld exklusive dem tieffrequenten Bereich ($f < 125$ Hz) zusätzlich zu den o. g. Größen dargestellt.

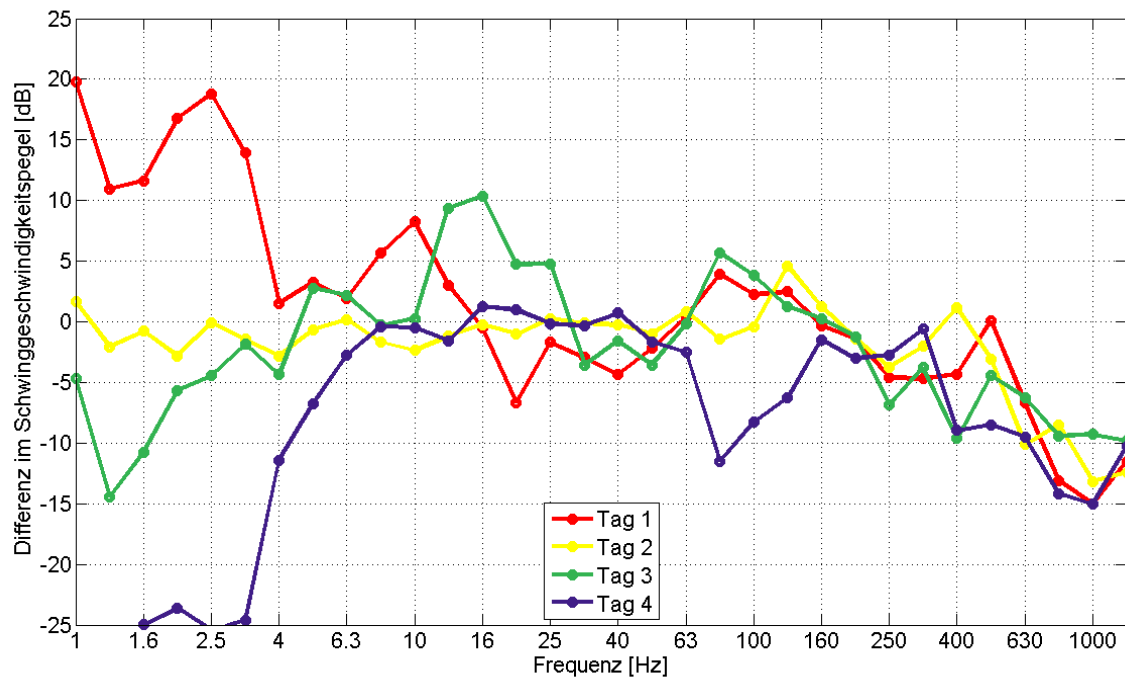


Abbildung 86: Dämpfung des Schwinggeschwindigkeitspegels (Erschütterungen im Sediment; in einem Abstand von 13 m zum Pfahl ohne und mit Schallminderungssystem an den vier Untersuchungstagen (MP5.5)). An den Tagen 1 und 2 wurde dieselbe Messposition verwendet. An den Tagen 3 und 4 sind die Positionen aufgrund der unterschiedlichen Lage des Stelzenpontons vor dem Pfahl verändert worden. (Eine Schwinggeschwindigkeit von 10 mm/s entspricht einem Schwinggeschwindigkeitspegel von 140 dB).

Aus Tabelle 13 zeigt sich, dass ohne eine mögliche Bodenkopplung (Spalte 5), d. h. exklusive aller Frequenzen < 100 Hz, die Schallminderungspotenziale **um 2 bis 3 dB** für jedes getestete System ansteigen. Dies ist eine rein theoretische maximale Abschätzung des Einflusses der Bodenkopplung. In der Spalte 6 der Tabelle 13 sind die gemessenen Schallminderungswerte (SEL breitbandig) im Nahfeld (MP5.1, 13 m Abstand) dargestellt. Aufgrund des geringen Abstandes zwischen Pfahl und Messposition sollte der Einfluss einer möglichen Bodenkopplung ebenfalls reduziert sein. Die Schallminderungswerte sind um bis zu 2,0 dB höher als im Fernfeld über das gesamte Frequenzspektrum (Tabelle 13, Spalte 4).

Dies lässt vermuten, dass die Bodenkopplung a) tieffrequenter Natur ist und b) einen Einfluss von bis zu 3,0 dB auf die Schallreduzierung von Schallminderungssystemen im vorliegenden Fall haben kann.

Normalerweise ist der Einfluss der Bodenkopplung deutlich geringer und liegt lediglich in einzelnen Terzbändern höher, jedoch breitbandig ergeben sich während des Rammvorgangs (zu Beginn und am Ende) keine wesentlichen Einflüsse. Dies wird durch Messungen an einem Pfahl bei der Erstellung des Windparks Baltic II bestätigt, Abbildung 87.

Nr.	System	Schallminderungssystem	Δ SEL [dB]		
			Differenz ohne/mit Schallminderungssystem		
			12,5 – 16.000 Hz	125 – 16000 Hz	12,5 – 16.000 Hz
		Median über MP1.1 – MP4.1 (Fernfeld)	MP5.1 (Nahfeld)		
1	1	IHC NMS mit Blasen- schleier	5,6	8,7	7,3
2		IHC NMS ohne Blasen- schleier	5,1	8,1	6,4
3	2	Menck FWSM mit 1,0 bar	5,0	7,2	6,4
4		Menck FWSM mit 2,0 bar	4,4	6,5	5,8
5	3	Weyres LBC	4,2	5,3	5,4
6	4	Weyres BeKa 0 bar	5,9	8,2	6,9
7		Weyres BeKa 5 bar	5,9	8,1	6,8
8		Weyres BeKa 7 bar	6,1	8,3	6,8
9	5	Elmer HSD M Ring	5,0	6,6	6,2
10		Elmer HSD A Ring	4,2	6,7	6,9
11		Elmer HSD I Ring	5,4	8,0	6,2
12		Elmer HSD MA Ring	5,4	7,2	7,5
13		Elmer HSD MI Ring	4,9	7,4	6,8
14		Elmer HSD AI Ring	5,4	7,0	7,4
15		Elmer HSD MAI Ring	5,4	7,5	7,6

Tabelle 13: Zusammenfassung der Schallminderungspotenziale der getesteten fünf Schallminderungssysteme inkl. Variationen als Median über die Fernfeldmessungen (MP1.1 bis MP4.1). Zusätzlich sind die Minderungspotenziale ohne eine mögliche Bodenkopplung im Fernfeld im Frequenzbereich 125 Hz aufwärts und gemessen im Nahfeld an der Position MP5.1 dargestellt

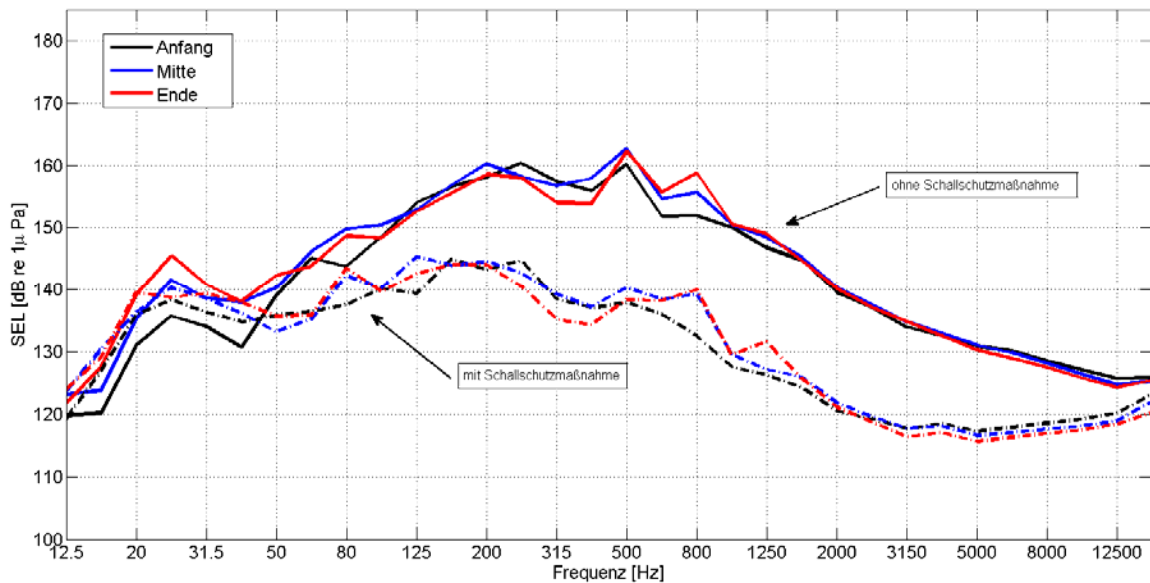


Abbildung 87: Terzspektrum bei Rammarbeiten am Windpark Baltic II an einem Pfahl ohne und mit einem Schallminderungssystem (Blasenschleier). Die Spektren sind zu Beginn der Gründung (d. h. Einbringtiefe wenige Meter), in der Mitte und zum Ende der Gründung (d. h. kaum bzw. kein Vorschub bei Rammung) dargestellt.

Es zeigt sich, dass sich unter Verwendung eines Schallschutzsystems (hier Blasenschleier) im Verlauf der Gründung um $f = 80$ Hz eine Bodenkopplung ausbildet. Aufgrund der geringen statischen Masse des Schallminderungssystems liegt der Effekt im Bereich 1 bis 1,5 dB.

9.1.3. Vergleich eines ESRa –Schallminderungssystems an verschiedenen Standorten

Im Rahmen des niederländischen Forschungsprojektes FLOW (Far Large Offshore Wind) wurde von der RWE Innogy GmbH an zwei Nordseestandorten (Nordsee Ost und Ijmuiden) in Zusammenarbeit mit der Firma IHC und der TU Delft das IHC NMS beim Rammen der dortigen Messmaste eingesetzt [26].

Beide Messmaste wiesen einen Durchmesser von 3,35 m bei einer Wassertiefe von 25 m auf. Verwendet wurde ein IHC S800 Hammer. Das NMS wies einen Aussendurchmesser von 4,57 m auf. Die Impedanzschicht hatte etwa gleiche Dimensionen wie bei ESRa, jedoch wurden im Gegensatz zum System für ESRa die beiden Stahlbleche des NMS durch Kunststoffhalter akustisch entkoppelt.

Die Messergebnisse für den breitbandigen SEL sind in Abbildung 88 dargestellt. Es ergeben sich Reduktionen von 9 dB für den Standort Nordsee Ost und 11 dB für den Standort Ijmuiden. Bei dem Vergleich ist zu beachten, dass der Pfahl für den Standort Nordsee Ost mehrere Wochen festwachsen konnte bis das NMS im Rahmen eines Restrike-Tests eingesetzt wurde.

Ein Vergleich der hier erzielten Ergebnisse zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten des NMS bei ESRa, wenn man die Bodenkopplung, gemäß der Empfehlung des vorherigen Kapitels, mit 2-3 dB herausrechnet (Tabelle 13, Spalte 5). Bewertet man zudem die verbesserte Entkopplung der beiden Stahlbleche des NMS mit -1dB , liegen die korrigierten Ergebnisse von ESRa mit $\Delta\text{SEL} = 8,7\text{ dB}$ zwischen den korrigierten Werten der FLOW-Tests von 8 – 10 dB.

Die Versuche im Rahmen von FLOW konnten somit die Ergebnisse von ESRa indirekt bestätigen und validieren.

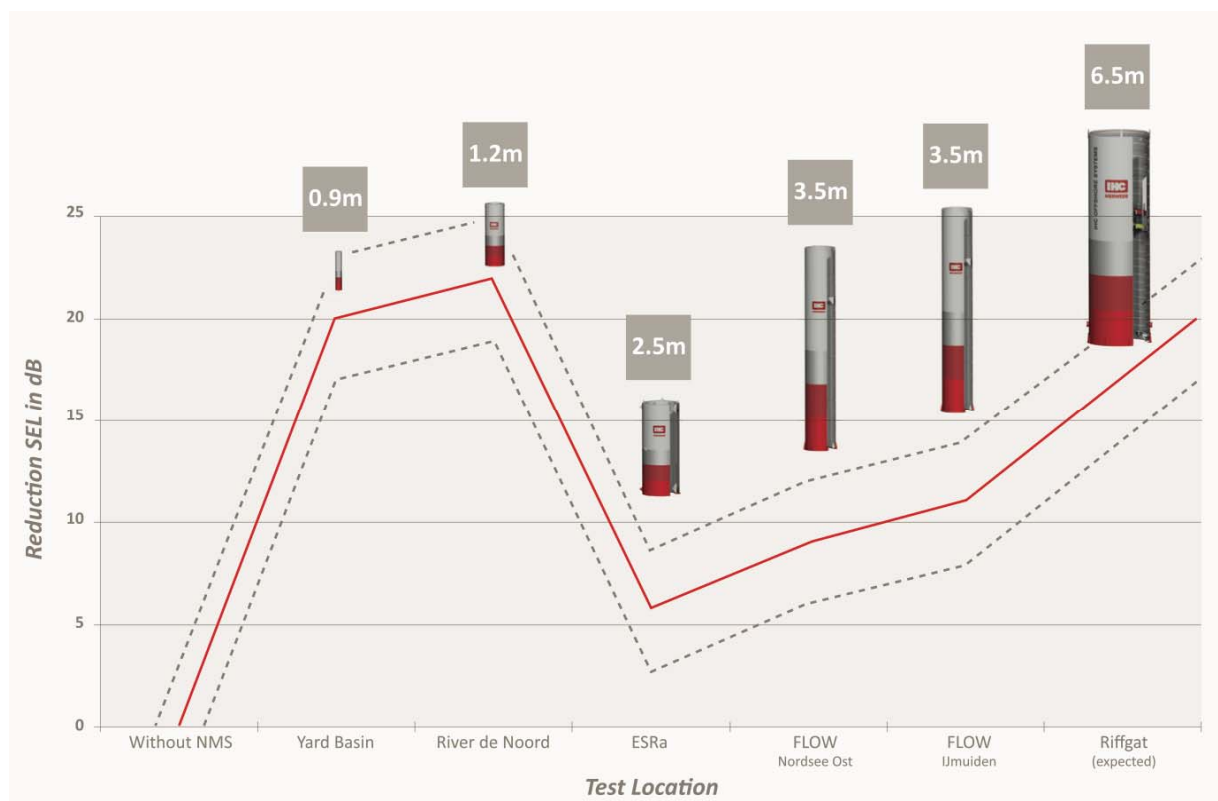


Abbildung 88: Erzielte Reduktionen ΔSEL mit dem IHC NMS an verschiedenen Standorten (Quelle: IHC, mit freundlicher Genehmigung)

9.1.4. Einfluss der Wassertiefe

Eine weitere Auffälligkeit in den frequenz aufgelösten Schallminderungspotenzialen der einzelnen Schallminderungssysteme (Abbildung 61) ist die nahezu identische Dämpfung des Unterwasserschalls um ca. 10 dB systemunabhängig bei einer Frequenz um die 160 Hz. Eine Ausnahme bildet hier der Weyres Little Bubble Curtain (LBC).

Aus der Theorie ist bekannt, dass die kontinuierliche Schallabstrahlung im Wasser abhängig von den Schallgeschwindigkeiten des Sediments und des Wassers, sowie von der Wasserhöhe ist:

$$f_g = \frac{c_{\text{Wasser}}}{4h} \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{c_{\text{Wasser}}}{c_{\text{Sediment}}}\right)^2}} \quad [\text{Hz}] \quad \text{Gl. 9.1}$$

mit

- f_g - Grenzfrequenz für die Ausbreitung von Schall bei kontinuierlicher Anregung [Hz]
 h - Wassertiefe [m]
 c_{Wasser} - Schallgeschwindigkeit in Wasser [m/s]
 c_{Sediment} - Schallgeschwindigkeit im Sediment [m/s]

Die Näherungsformel 9.1 gilt streng genommen nur für eine kontinuierliche Anregung in Wasser und nicht für eine impulsförmige Anregung. Aus diesem Grund ist auch Schall unterhalb der Grenzfrequenz f_g bei Rammschlägen zu messen (z. B. Abbildung 44).

Nimmt man folgende Randbedingungen an: Wassertiefe $h = 8,5$ m, (gemessen) $c_{\text{Wasser}} = 1485$ m/s und (geschätzt) $c_{\text{Sediment}} = 1600$ m/s, so ergibt sich nach Gleichung 6.1 eine Grenzfrequenz von ca. 163 Hz.

Alle o. g. Schallminderungssysteme, mit Ausnahme des Weyres LBC, besitzen eine mehr oder minder starre Verbindung zwischen Sediment und Wasseroberfläche (Stahlrohr, Schläuche oder Netze). Es lässt sich vermuten, dass aufgrund der impulsförmigen Anregung des Rammens diese Schallminderungssysteme zu einer Eigenschwingung (Resonanz) mit f_g angeregt werden. Somit lässt sich vermuten, dass die Schallminderung um die 160 Hz nicht auf die Wirkungsweisen der einzelnen Schallminderungsmaßnahmen zurückzuführen ist, sondern durch die gegebenen Randbe-

dingungen des Pfahles (Wassertiefe, Geschwindigkeiten im Sediment und Wasser) und der Verbindung zwischen Wasseroberfläche und Sediment verursacht wird. Diese Hypothese könnte die nahezu identische Dämmung aller getesteten Schallminderungsmaßnahmen erklären.

9.1.5. Zwischenfazit

Es lässt sich aus der bisherigen Diskussion folgendes festhalten:

- Rammspektren am *Brodterer Pfahl* ähneln denen an Vergleichsstandorten.
- *Brodterer Pfahl*: Bodenkopplung um $80 < f < 100$ Hz ist stark ausgeprägt.
- 1. lokales Maximum in frequenzabhängiger Dämpfung bei allen NMS (außer LBC) bei $f = 160$ Hz vorhanden.

Daraus lassen sich folgende Hypothesen ableiten:

- > **Hypothese 1:** Dämpfung bei $f = 160$ Hz ist auf Wassertiefe und verwendetes NMS zurückzuführen.
- > **Hypothese 2:** Schallminderungssysteme "wirken" im Nahfeld, d. h. es ist keine Dämpfung der Bodenkopplung zu erwarten.

9.2 Stand der Wissenschaft im Bereich Schallminderungskonzepte bzw. Schallminderungssysteme

9.2.1. Schallminderungssysteme im Überblick

In Abbildung 89 sind die frequenzabhängige Reduktion (Schalldurchgangsdämpfung) des Rammschalls durch die BeKa-Schale (ESRa-Projekt) mit innenliegendem Blasenschleier mit 7,9 bar im Vergleich zu dem eingesetzten großen Blasenschleier bei Fino3 [12], dem kleinen gestuften Blasenschleier bei alpha ventus [5], einem Blasenschleier bei dem Projekt Baltic II und einem Rohr mit Schaumstoffbeschichtung (Forschungsvorhaben UFO Plan) am *Brodterer Pfahl* [9] dargestellt. (Eine nähere Beschreibung der zum Einsatz gekommenen Schallminderungssysteme ist der Sekundärliteratur zu entnehmen.)

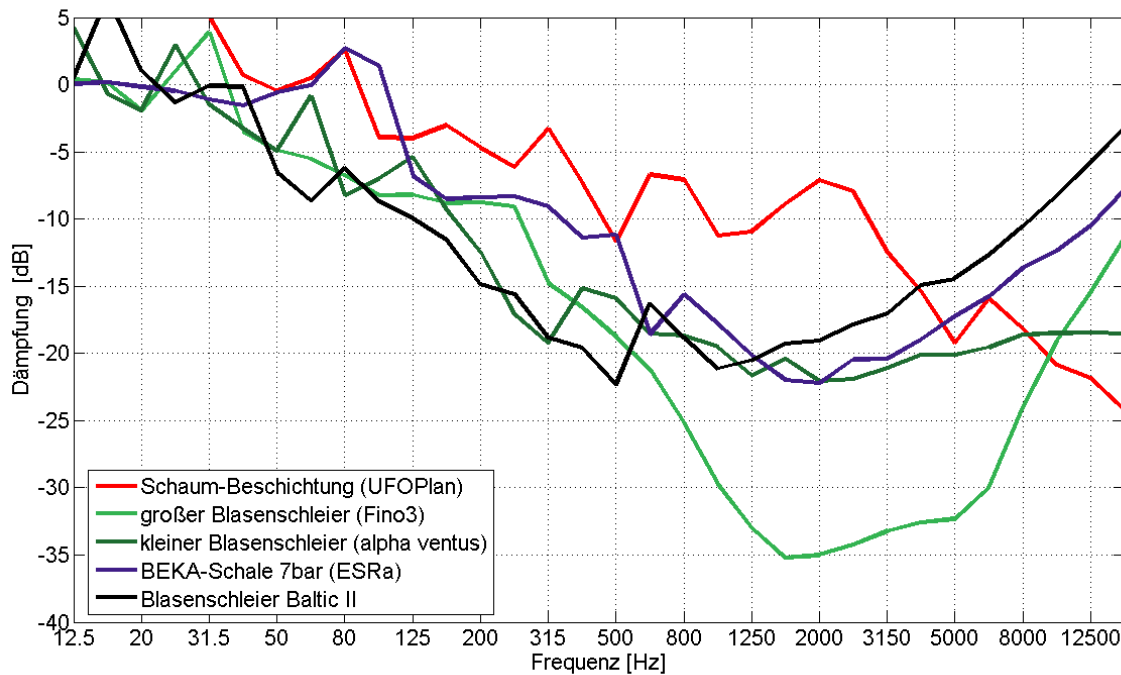


Abbildung 89: Frequenzabhängige Reduktion des Rammschalls durch verschiedene Schallminderungsmaßnahmen aus der Literatur [5], [9], [12] und aus dem vorliegenden Forschungsvorhaben

Im Frequenzbereich zwischen 60 und 100 Hz ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen der BeKa-Schale und der Schaumbeschichtung auf der einen Seite und den diversen Blasenschleiern (FINO3, alpha ventus und Baltic II). Die Schaumbeschichtung wurde ebenfalls im Jahr 2006 im Rahmen eines Forschungsvorhabens am *Brodterer Pfahl* unter annähernd gleichen Bedingungen wie in diesem Vorhaben getestet. Es zeigt sich bei beiden gezeigten Systemen am *Brodterer Pfahl* eine „negative“ Dämpfung in diesem Frequenzbereich, d. h. es ist mehr Energie im Wasser vorhanden mit einem Schallminderungssystem als ohne. Dies ist auf eine starke Bodenkopplung zurückzuführen. Im Gegensatz dazu, besitzen die o. g. Blasenschleier sowohl in der Nord- als auch in der Ostsee eine Dämpfung von 5 bis 10 dB.

Im Frequenzbereich zwischen 125 und 500 Hz weisen die diversen Blasenschleier ebenfalls eine höhere Schallreduktion (5 bis 10 dB) als die BeKa-Schale auf.

Zu höheren Frequenzen erhöht sich bei dem großen Blasenschleier bei FINO3 die Reduktion auf bis zu 35 dB. Im Gegensatz dazu liegt das Schallminderungspotenzial

bei der BeKa-Schale und den anderen eingesetzten Blasenschleiern in diesem Frequenzbereich im Bereich von 20 dB und ist somit vergleichbar.

Die Reduktion im Einzelereignispegel (SEL) bei dem kleinen Blasenschleier bei alpha ventus beträgt breitbandig 8,0 bis 12,0 dB, bei dem großen Blasenschleier bei FINO3 10,0 bis 14,0 dB. Der getestete kleine geführte Blasenschleier bei ESRa (Weyres LBC) weist ein Reduktionspotenzial von 4,0 bis 5,0 dB auf. Diese Werte, bis auf den LBC, sind jedoch stark abhängig von der vorherrschenden Strömung, da in beiden Fällen die Blasenschleier nicht geführt worden sind, d. h. von der Strömung verdriftet wurden. Das bedeutet, dass sich bei ungünstigen Wetterbedingungen ggfs. eine starke Reduktion des Unterwasserschalls auf der einen Seite des Pfahls ergibt (in Strömungsrichtung), während keine Reduktion auf der gegenüberliegenden Seite zu messen ist. Zusätzlich breitet sich aufgrund des abnehmenden Wasserdrucks zur Wasseroberfläche hin ein v-förmiges Profil der Blasen aus.

Ein weiterer Unterschied zwischen dem Blasenschleier in der BeKa-Schale bzw. dem LBC und den anderen o. g. Blasenschleiern ist, dass der Blasenschleier in der BeKa-Schale bzw. beim LBC direkt am Pfahl anliegt und auf eine begrenzte Breite von ca. 20 bis 30 cm geführt wird. Im Gegensatz dazu bildeten sich an der Wasseroberfläche bei FINO3 und alpha ventus Blasenringe mit mehreren Metern Durchmesser aus, die z.T. deutlichen Abstand zum gerammten Pfahl hatten.

Über die Wirkung von Blasenschleier und deren wesentlichen Variablen (z. B. Luftmenge, Blasengröße und Verteilung der Blasen) liegen nur wenig Erkenntnisse vor [2]. Es wird jedoch vermutet, dass die gerichtet einstrahlende Schallenergie im Blasenschleier durch Mehrfachreflexionen ungerichtet abgestrahlt wird und somit eine Reduktion der Schallenergie bewirkt. Durch die Mehrfachreflexion an mehreren nebeneinanderliegenden Luftbläschen im Wasser werden vermutlich auch Wellenlängen reflektiert, die in einem Zusammenhang mit der Breite des Blasenschleiers stehen. D. h. je mehr der Blasenschleier v-förmig zur Wasseroberfläche hin sich verbreitert, desto tiefere Frequenzen können gedämpft werden. Eine exakte analytische Berechnung dieses Phänomens ist derzeit jedoch nicht möglich.

Hinzu kommt, dass die Luftbläschen im Wasser vorwiegend auf den Schalldruck und nicht auf die Schnelle „wirken“, sodass vermutlich die Wirkung eines Blasenschleiers

in einiger Entfernung (nahezu Fernfeldbedingungen) höher sein wird als im Nahfeldbereich.

Um das Schallminderungspotenzial (breitbandig) der getesteten Schallminderungssysteme zu verbessern, ist eine höhere Dämpfung des Hydroschalls im Bereich 100 bis 500 Hz notwendig, da in diesem Bereich beim Rammschall am meisten Energie enthalten ist, Abbildung 83.

9.3 Wie lassen sich die getesteten Schallminderungssysteme aus ESRa verbessern?

Aus der Abbildung 51 bis Abbildung 60 ergeben sich für jedes getestete Schallminderungssystem, mit Ausnahme des Weyres LBC Systems, ausgeprägte Minima in den Differenzspektren der Unterwasserschallmessungen ohne und mit Schallminderungssystem. Dies bedeutet, dass bei diesen Frequenzen das jeweilige Schallminderungssystem eine besonders hohe Reduktion des Unterwasserschalls bewirkt hat. Die Frage, die sich stellt, ist, ob die Dimensionierung der einzelnen Systeme einen Einfluss, und wenn ja, welchen Einfluss auf diese Frequenzen hat. Aus diesem Grund wird in Abbildung 90 am Beispiel der IHC NMS System der Schalldurchgang durch das doppelwandige Rohr veranschaulicht.

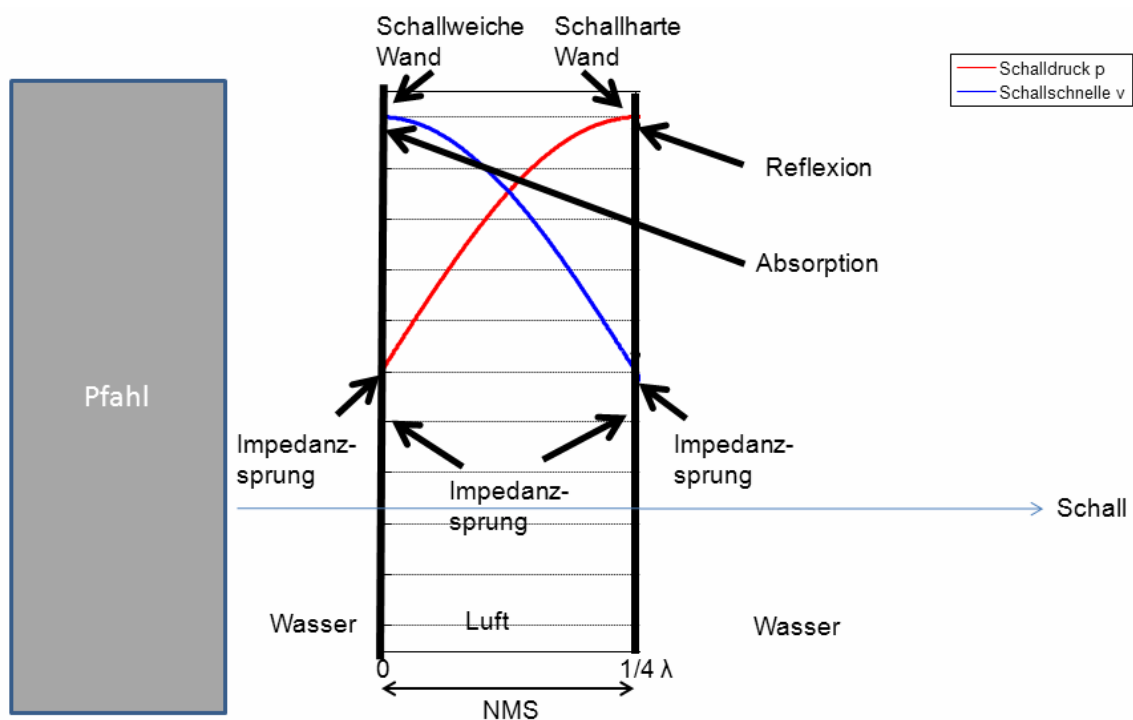


Abbildung 90: Schematischer Versuchsaufbau am Beispiel des IHC NMS Systems. Der Schall wird von dem Pfahl abgestrahlt und durchläuft nacheinander die Medien Wasser, Stahl, Luft, Stahl und wieder Wasser.

Zunächst einmal wird von dem Pfahl eine Schallabstrahlung ins Wasser erfolgen. Die Schallwellen treffen danach auf ein Stahlrohr (Innenrohr des IHC NMS Systems) und somit auf einen Sprung in der Schallkennimpedanz Z des Mediums. Ein zweiter Impedanzsprung erfolgt beim Übergang vom Stahlrohr zur innenliegenden Luftkammer

zwischen dem doppelwandigen Rohr. Weitere Impedanzsprünge erfolgen beim Übergang Luft zu Stahlrohr (Außenrohr) und Stahlrohr zu Wasser. Aus der Theorie ist bekannt, dass bei jedem Impedanzsprung im Ausbreitungsmedium ein Teil des Schalles reflektiert und ein Teil des Schalles transmittiert wird [z. B. [28], [3]]. Bei dem Impedanzsprung von Stahlrohr (Innenrohr) zu Luft ist aufgrund der unterschiedlichen Materialien davon auszugehen, dass es sich um einen schallweichen Abschluss handelt. Somit wird der Reflexionsfaktor im Bereich von -1 liegen. Dies bedeutet, dass die Schallschnelle v beim Übergang von Stahl in Luft maximal und der Schalldruck p minimal ist. Beim Übergang Luft zum Außenstahlrohr handelt es sich um einen schallharten Abschluss. Der Reflexionsfaktor wird nahe 1 liegen. Dies bedeutet, dass der Schalldruck p maximal und die Schallschnelle v minimal ist. Für den Fall, dass der Abstand zwischen den beiden Rohren einer viertel Wellenlänge ($\lambda/4$) entspricht, ist der Schalldruck maximal am äußeren Stahlrohr und wird stark reflektiert (schallharter Abschluss), bzw. nur geringe Anteile des Schalls werden transmittiert.

Bei einer überschlägigen Berechnung aus den frequenz aufgelösten Differenzspektren (Terzspektren) und aus den ungefähren Angaben der Hersteller über die Dicken ihrer Schallminderungssysteme lässt sich folgern, dass es jedes Mal, wenn ein Viertel Wellenlänge ($\lambda/4$) dem Abstand zwischen zwei Impedanzsprünge (erst schallweich, anschließend schallhart) im Schallminderungssystem entspricht (z. B. Abstand der Rohre beim IHC NMS System oder bei der BeKa-Schale), ein lokales Maximum in der Schallreduktion vorhanden ist.

Es lässt sich somit vermuten, dass aufgrund der diversen Impedanzsprünge und der Tatsache, dass man zunächst einen schallweiche und anschließend einen schallharten Abschluss im Schallminderungssystem einbringt, eine Art $\lambda/4$ - Resonator entsteht, der den Schalldurchgang bei bestimmten Frequenzen minimiert.

9.4 Fazit

In Kapitel 9.3 ist ein möglicher Erklärungsansatz der getesteten Schallminderungspotenziale erarbeitet worden. Aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen und den geringen Variationen innerhalb dieses Projekts, können die o. g. Ausführungen lediglich als Hypothese bzw. Versuch einer Erklärung herangezogen werden und bedürfen weitergehender systematischer Untersuchungen und Variation, um die Schallminderung beim Rammen zu optimieren.

Sollte sich das Prinzip eines $\lambda/4$ - Resonators durch weitergehende Versuche bestätigen, so ist die Dimensionierung der Schallminderungsmaßnahmen auf den jeweiligen Frequenzbereich mit dem höchsten Energieeintrag beim Rammen in Wasser zu optimieren. Zusätzlich könnte durch geeignete Anbringung von zusätzlichen Materialien, z. B. porösen Absorbern oder Materialien mit unterschiedlichen Schallkennimpedanzen (gleitende Impedanzanpassung), der Schalldurchgang durch die Schallminderungssysteme minimiert werden. Dabei ist darauf zu achten, ob die Materialien einen Einfluss auf die Schallschnelle v (z. B. poröser Absorber) oder auf den Schalldruck p (z.B. Impedanzsprung) besitzen.

Ein weiterer offener Punkt ist die Lage inkl. Wirkungsweise der verwendeten Schallminderungssysteme. Aus der Theorie (z. B. Kolbenstrahler) ist bekannt, dass der Schalldruck p der Schallschnelle v im Nahfeld, d. h. nahe an der Quelle, vorausschlägt. Im Nahfeld beträgt die Phasenverschiebung 90° . Im Fernfeld sind beide Schallfeldgrößen phasengleich [28]. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Schallschnelle sich aus einem Wirk- und einem Blindanteil zusammensetzt. Der Blindanteil nimmt im Nahfeld mit dem Abstand zur Quelle deutlich ab. Dies bedeutet jedoch auch, dass im Nahfeld kein wirklicher Schallenergie-transport stattfindet, sondern erst im Fernfeld. Aus der Theorie wird für Luft die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld frequenzabhängig bei ca. 2λ angenommen.

Der Unterwasserschall bei Rammschlägen weist in der Regel ein ausgeprägtes Energiemaximum im Bereich zwischen 100 und 500 Hz auf. Dies bedeutet, dass die Wellenlänge von 100 Hz bei einer Schallgeschwindigkeit von ca. 1.500 m/s in etwa 15 m entspricht, bei 500 Hz in etwa 3 m. Derzeit ist aus der Theorie bzw. aus Messungen nicht hinreichend bekannt, wo der Übergang von Nah- zu Fernfeld bei der Rammung eines Pfahls ist. Nimmt man in erster Näherung 2λ (bis 10λ) an, so wird

man sich frequenzabhängig innerhalb der ersten 6 bis 30 m um den Pfahl sicherlich im akustischen Nahfeld befinden.

(Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass ein Pfahl während des Rammvorganges nicht als Kolbenstrahler anzusehen ist. Die genaue Wirkungs- und Abstrahlwirkung eines Pfahls ist derzeit Thema in bestehenden und kommenden Forschungsvorhaben.)

Die bei diesem Forschungsvorhaben eingesetzten Blasenschleier sind alle sehr dicht an dem Pfahl positioniert worden und sind alle in ihrer Breite begrenzt bzw. geführt worden, z. B. durch Rohre oder Ableitbleche. Dies könnte ein Grund dafür sein, warum der Einsatz der Blasenschleier bei den Weyres BeKa-Schalen und dem IHC NMS keinen bzw. nur einen geringfügigen Zuwachs der Dämmung (nur) bei hohen Frequenzen bewirkten. Detailliertere Untersuchungen bzw. Zusammenhänge zwischen Luftmenge, Blasengröße, Breite des Blasenschleiers und deren Wirkung auf die Schallreduktion sind jedoch derzeit nicht verfügbar.

Ein weiterer Punkt ist, dass die Ergebnisse aus den Messungen im Fernfeld sich doch deutlich von den Ergebnisse aus dem Nahfeld unterscheiden. Es deutet sich an, dass die Spektren (des Rammschalls) im Nahfeld wesentlich mehr Energie bei hohen als bei tiefen Frequenzen aufweisen und somit das typische Energiemaximum $100 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$ sich eher zu Frequenzen bis hin zu 800 Hz verlagert .

Bei der Betrachtung der Differenzspektren (mit und ohne Schallminderungsmaßnahme) gemessen im Fern- und Nahfeld zeigt sich, dass sich die breitbandige Durchgangsdämpfung (ΔSEL) leicht erhöht. Der Grund dafür ist derzeit nicht bekannt. Es lässt sich jedoch vermuten, dass sich der Einfluss der Phasenverschiebung zwischen Schalldruck p und Schallschnelle v im Nahfeld sich bemerkbar macht.

Aus der Diskussion ergeben sich somit folgende Arbeitshypothesen für weitere Forschungs- und Entwicklungsansätze:

- Hypothese 1:** Dämpfung der NMS (ESRa) bei $f = 160$ Hz ist auf die Wassertiefe zurückzuführen.
- Hypothese 2:** NMS "wirken" im Nahfeld, d. h. es ist keine Dämpfung der Bodenkopplung zu erwarten.
- Hypothese 3:** Durch Dimensionierung ($\lambda/4$) und Wirkungsweise (Schnelle oder Druck) der getesteten NMS ist eine deutliche Verbesserung des Δ SELS zu erzielen.

Somit sollte in weitergehenden Untersuchungen und Messungen sowohl das Wirkungsprinzip als auch der Einfluss des Abstands zum Pfahl der Schallminderungsmaßnahmen systematisch untersucht werden.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des ESRA Forschungsprojektes sind am Brodtener Pfahl in der Lübecker Bucht (Ostsee) das Handling und die Wirkungsweisen von fünf unterschiedlichen Schallminderungssystemen für den Bau von geramnten Offshore-Windenergieanlagen in einem Ringversuch getestet worden.

Die itap GmbH hat dafür ein entsprechendes Mess- und Auswertungskonzept für Unterwasserschallmessungen in Anlehnung an das bestehende StUK 3 Konzept zu erarbeiten, sowie die Messungen durchzuführen und auszuwerten.

Die Messungen ergaben folgende Resultate:

- Die Auswertung der Unterwasserschallmessungen hat gezeigt, dass sich mit den fünf unterschiedlichen Schallminderungsmaßnahmen im Prinzip ein wirksamer Schallschutz realisieren lässt. Die breitbandige Reduktion des Einzelereignispegels (SEL) beläuft sich auf 4,2 bis 6,1 dB. Die Schallreduktion ist hingegen aber stark frequenzabhängig. Die getesteten Schallminderungssysteme besitzen im hochfrequenten Bereich ($f > 500$ Hz) ein hohes Schallminderungspotenzial, im tieffrequenten Bereich hingegen nur ein geringes Reduktionspotential.
- Am *Brodtener Pfahl* tritt eine besonders starke Bodenkopplung aufgrund der Abmessungen des Pfahles und der Tatsache, dass der Pfahl fest gewachsen ist, auf. Jedoch ist dieser Effekt qualitativ mit 1,0 bis 3,0 dB abzuschätzen, sodass zu erwarten ist, dass die eingesetzten Schallminderungsmaßnahmen an anderen nicht festgewachsenen Pfählen Schallminderungspotenziale von 7 – 9 dB ergeben.
- Es sind erstmals Messungen der Sedimenterschütterungen in der Nähe des Pfahles durchgeführt worden. Diese Messungen geben wertvolle Hinweise bzgl. der Bodenkopplung des Pfahles.
- Es ist eine große Datenbank für Rammschallmessungen im Nah- und Fernfeld (> 650 Datensätze) generiert worden.
- Es ist ein besseres Verständnis der Schallabstrahlung, aber auch der Wirkungsweisen der einzelnen Schallminderungskonzepte erlangt worden.

- Zur Erhöhung des Δ SELS müsste bei den getesteten Schallminderungskonzepten die Dämmung im Frequenzbereich $100 < f < 500$ Hz verbessert werden.
- Es zeigt sich, dass mit Verringerung des Abstands zwischen Messposition und Pfahl die Schalldurchgangsdämpfung erheblich zunimmt (Nah- und Fernfeld). Der Grund für die Zunahme der Dämpfung ist derzeit nicht eindeutig erklärbar.

Aus der Diskussion ergeben sich folgende Ansätze und Hypothesen für eine Optimierung der Schallminderungssysteme:

Die Dämpfung der NMS (ESRa) bei $f = 160$ Hz ist auf die Wassertiefe zurückzuführen. Die NMS "wirken" im Nahfeld, d. h. es ist keine Dämpfung der Bodenkopplung zu erwarten. Durch Dimensionierung ($\lambda/4$) und Wirkungsweise (Schnelle oder Druck) der getesteten NMS ist eine deutliche Verbesserung des Δ SELS zu erzielen.

In weitergehenden Untersuchungen und Messungen sollte somit sowohl das Wirkungsprinzip als auch der Einfluss des Abstands zum Pfahl der Schallminderungsmaßnahmen systematisch untersucht werden. Es lässt sich jedoch festhalten, dass die Schallabstrahlung eines zu rammenden Pfahls hochgradig nicht trivial ist. Die Abstrahlung und der mögliche Einfluss einer Bodenkopplung sind derzeit aus wissenschaftlicher Sicht noch unklar und rücken mehr und mehr in den Fokus der Forschung (z.B. Projekt BORA, gefördert vom BMU), da nur durch die Kenntnis des Nah- und Fernfeldes eine vollständige Modellierung der Schallabstrahlung eines gerammten Pfahls möglich wird. Nach derzeitigem Kenntnisstand existiert kein Modell, das die Schallabstrahlung eines Pfahls phänomenologisch und physikalisch korrekt im Nah- und Fernfeld simulieren kann.

Damit ergibt sich aus den Ergebnissen von ESRa der folgende Ausblick auf mittel- und langfristig durchzuführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten:

- Das Know-how aus ESRa sollte verwendet, um bestehende Schallschutzsysteme iterativ zu verbessern. Im Falle des IHC NMS wurde dies für das Projekt Riffgat bereits umgesetzt.

- Verbesserte Schallschutzsysteme sollten bei einem realen Errichterprozess (laufender Pfahl) getestet werden.
- Eine detaillierte Untersuchung des akustischen Nahfeldes mit Verteilung von Druck und Schnelle sollte durchgeführt werden
- Es sind phänomenologisch und physikalisch motivierte Modelle zur Simulation der Abstrahlung eines zu rammenden Pfahls zu entwickeln
- Der Einfluss der Bodenkopplung sollte systematisch untersucht werden

Wenn die angeführten Entwicklungsarbeiten erfolgreich umgesetzt werden, könnte es in der Zukunft möglich sein, auf der Basis von Modellen effektive Schallschutzsysteme individuell für den Standort und den Strukturtyp zu entwickeln.

11. Verwendete Literatur, Richtlinien und Hilfsmittel

- [1] BSH (2007) Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK3). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
- [2] Nehls G und Betke K (Entwurf 2011): Darstellung und Bewertung der Auswirkungen von Schallemissionen durch Offshore-Rammarbeiten auf Meeressäuger. Im Auftrag des Offshore Forum Windenergie
- [3] Meyer E und Neumann EG (1979) Physikalische und technische Akustik, Vieweg Verlag , Braunschweig
- [4] Thiele R und Schellenstede G (1980): Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik
- [5] Betke K und Matuschek R (2011): Messungen von Unterwasserschall beim Bau der Windenergieanlagen im Offshore-Testfeld „alpha ventus“. Abschlussbericht zum StUK3-Monitoring vom 20.05.2011
- [6] Urick R (1983): Principles of underwater sound, 3rd ed. Pensinsula Publishing, Los Altos
- [7] Elmer, K-H, Betke, K, Neumann, T (2007): Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-WEA, (SCHALL 2); Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben FZK 0329947, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- [8] CRI, DEWI, ITAP (2004): Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen. Abschlussbericht zum BMU-Projekt (FKZ 0327528A). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- [9] Schultz-von Glahn, M, Betke, K, Nehls, G (2006): Minderung des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten für Offshore-WEA - Praktische Erprobung verschiedener Verfahren unter Offshore-Bedingungen. UFOPLAN Ref. No. 205 53 113, Abschlussbericht, Umweltbundesamt, Berlin
- [10] Elmer, K-H, Betke, K, Neumann, T (2007): Untersuchung von Schallminderungsmaßnahmen an FINO2; Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben FZK 0329947A, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin

- [11] LU Hannover/DEWI/ITAP (2007-2010): Konzeption, Erprobung, Realisierung und Überprüfung von lärmarmen Bauverfahren und Lärminderungsmaßnahmen bei der Gründung von Offshore-Windenergieanlagen, Projekt „Schall 3“ (FKZ 0327645a)
- [12] Grießmann T, Rustemeier J, Betke K, Gabriel J, Neumann T, Nehls G, Brandt M, Diederichs A und Bachmann J (2010): Erforschung und Anwendung von Schallminimierungsmaßnahmen beim Rammen des FINO3 – Monopiles. Hannover, Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben „Schall bei FINO3“, FKZ0325077
- [13] LU Hannover/Menck (2007-2010): Verbundprojekt im Rahmen von alpha ventus. Erforschung der Schallminderungsmaßnahme "Gestufferter Blasenschleier (Little Bubble Curtain)" im Testfeld alpha ventus
- [14] Wilke F und Kloske K (2011): Projekt: Evaluation von Systemen zur Ramm-schallminderung an einem Offshore-Testpfahl. (Vorhabenbeschreibung PTJ-41V6069)
- [15] Marine Programm Ocean View (Sea Map): Kartenausschnitt Lübecker Bucht
- [16] Arbeitsgemeinschaft TAGU/HOCHTIEF: Baustelleneinrichtungs-Planung Projekt ESRa
- [17] Firma IHC (2012): ESRa Systemspezifikation IHC Rohr („Noise Mitigation Screen“)
- [18] Firma Menck (2012): ESRa Systemspezifikation Feuerwehrschauchmethode
- [19] Firma Weyres (2012): ESRa Systemspezifikation Little Bubble Curtain
- [20] Firma Weyres (2012): ESRa Systemspezifikation BeKa-Schale
- [21] TU Braunschweig/Dr. Elmer (2012): ESRa Systemspezifikation Hydro Sound Damper
- [22] BioConsult SH (2011): Forschungsprojekt ESRa – Artenschutzrechtliche Prüfung, NATURA 2000 – Vorprüfung, Vorprüfung der Verträglichkeit nach § 34 BNatSchG
- [23] Betke K, Schultz-von Glahn M, Matuschek R (2004): Underwater noise emissions from offshore wind turbines. In: Proceedings of the joint congress CFA/DAGA'04, pp. 591-592, Strasbourg
- [24] Gattermann J und Zahlmann J (2011): Pile driving monitoring – beim Projekt 'ESRa', Braunschweig, Messbericht Nr. 11297 der TU Braunschweig
- [25] Schultz-von Glahn M und Gerke P (Juni 2011): Messung der Hydroschall-Immissionen bei Probe-Rammarbeiten am Offshore-Windpark EnBW Baltic 2

sowie Messung und Beurteilung der Wirksamkeit von Schallminderungsmaßnahmen. itap Bericht Nr. 1653-10-svg

- [26] TNO (2012): Measurements of the Acoustic Insertion Loss of the IHC Underwater Piling Noise Mitigation Screen, TNO-DV 2012 C017
- [27] Nehls G, Betke K und Ros M (2007): Assessment and costs of potential engineering solutions for the mitigation of the impacts of underwater noise arising from the construction of offshore windfarms, Husum
- [28] Veitl (1996): Technische Akustik

12. **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Typisches gemessenes Zeitsignal des Unterwasserschalls bei einem Rammschlag in einigen 100 Metern Entfernung.	18
Abbildung 2: Der Testpfahl in der Nähe von Travemünde.....	24
Abbildung 3 Geografische Position des Testpfahls in der Lübecker Bucht (Quelle: [14]).....	25
Abbildung 4: Kartenausschnitt Lübecker Bucht [15] mit Kennzeichnung Testpfahl in der Nähe der Kardinaltonne Brodten-Ost.....	25
Abbildung 5: Lage des Sperrgebiets am Testpfahl.....	26
Abbildung 6: Hammerspezifikation MHU 270 T (Quelle: www.menck.com).....	28
Abbildung 7: Auf den Pfahl aufgesetzter Hammer (Foto: Patrice Kunte).....	29
Abbildung 8: Stelzenponton RHR 1 mit Ausrüstung (Foto: Patrice Kunte).....	30
Abbildung 9: Liegeplatz Stelzenponton im Basishafen Neustadt, Baustelleneinrichtungsplan [16]	31
Abbildung 10: Verwendeter Druckluftkompressor (Quelle: www.compair.de).....	32
Abbildung 11: Noise Mitigation Screen der Fa. IHC, Schematischer Aufbau.....	35
Abbildung 12: IHC NMS bei der Installation (Foto: Patrice Kunte).....	35
Abbildung 13: Blick in den Zwischenraum Pfahl/NMS während des Betriebs des Blasenschleiers (Foto: Patrice Kunte)	35
Abbildung 14: Menck Feuerwehrschauchsystem beim Abheben vom Deck der Arbeitsplattform (links) sowie bei der Installation am Pfahl (rechts) (Foto: Patrice Kunte) 36	
Abbildung 15: Detailaufnahme des unteren Endes des NMS mit den Anschlüssen der Feuerwehrschräuche (Foto: Patrice Kunte).....	37
Abbildung 16: Seafastening des Feuerwehrschauch-Systems (Foto: Patrice Kunte) 38	
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Bauteile des Feuerwehrschauch-Systems 40	
Abbildung 18: Eingefahrenes und teleskopisch ausgefahrenes LBC-System (Foto links: Patrice Kunte, Foto rechts: Weyres)	41

Abbildung 19: Blasenschleier generierende Ringleitungen im Bereich der Bodenwanne, die mit 50 mm Schaumstoff ausgekleidet ist (Quelle: Weyres)....	42
Abbildung 20: Kleiner gestufter Blasenschleier–LBC der Fa. Weyres im Einsatz (Foto: Patrice Kunte)	42
Abbildung 21: BeKa-Schale Fa. Weyres, schematische Konstruktionszeichnung.....	43
Abbildung 22: Zweiteiliger Aufbau der BeKa-Schale Fa. Weyres (Foto: Patrice Kunte)	45
<i>Abbildung 23: BeKa-Schale bei der Installation (Foto: Patrice Kunte).....</i>	<i>45</i>
Abbildung 24: Anwendungsbeispiele und Varianten von Netzen mit Hydroschalldämpfern (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)	46
Abbildung 25: Interaktion eines HSD-Ballons zur Streuung und Abstrahlung von Schallwellen (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)	47
Abbildung 26: HSD-Testsystem mit einem Netz (eingefahren, halb- und voll abgelassen) (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer).....	49
Abbildung 27: Konstruktionszeichnung der ESRa HSD-Plattform (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)	51
Abbildung 28: Fertigung des inneren Netzes mit doppellagigen luftgefüllten HSD-Ballons (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer)	51
Abbildung 29: Fertigung des mittleren Netzes mit HSD-Foam-Elementen (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer).....	52
Abbildung 30: Fertigung des äußeren Netzes mit einlagigen HSD-Ballons (Quelle: TU Braunschweig/Dr. Elmer).....	52
Abbildung 31: Die gesamte HSD-Plattform über dem Testpfahl (Foto: Patrice Kunte) 53	
Abbildung 32: Herablassen des inneren Netzes durch wissenschaftliche Muskelkraft (Foto: Patrice Kunte).....	53
Abbildung 33: Schematischer Versuchsaufbau (unmaßstäblich)	56
Abbildung 34: Autonome abgesetzte Messsysteme der itap GmbH für Unterwasserschallmessungen an den Messpositionen MP1 bis MP4. oben: Foto; unten: schematische Skizze.....	57
Abbildung 35: Messsystem („Array“) bestehend aus einem Geophon und vier Hydrophonen (MP5).Links: Foto; rechts: schematische Skizze	58
Abbildung 36: Verwendete Messpositionen.....	60

Abbildung 37: Messposition von Beschleunigungs- (rechts) und Dehnungssensor (links) am Brodtener Pfahl.....	61
Abbildung 38: Details Messaufnehmer Pfahlenergiemessung (Foto: Patrice Kunte)	62
Abbildung 39: Schematisches Zeitdiagramm des Versuchsablaufs pro Messtag.	66
Abbildung 40: FFH-Gebiet: „1931-301 Ostseeküste am Brodtner Ufer“	69
Abbildung 41: Prognostizierter Einzelereignispegel in 2 m Tiefe entlang der Strecken 1 und 2	70
Abbildung 42: Prognostizierter Einzelereignispegel in 8 m Tiefe in nordöstlicher Richtung vom Pfahl	70
Abbildung 43: Wassereigenschaften (Temperatur – rote Linie, Salzgehalt - grün und Schallgeschwindigkeit - blau) während einer repräsentativen Messung.	72
Abbildung 44: Terzspektren der Referenzmessungen (kein Schallminderungssystem) an der Messposition MP1.1 (750 m Entfernung, 1,8 m Hydrophönhöhe) bei einer Rammenergie von 300 kJ an den vier unterschiedlichen Messtagen.....	73
Abbildung 45: Terzspektren einer Referenzmessungen (kein Schallminderungssystem) an den Messposition MP1.1, MP2.1, MP3.1, MP4.1 und MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m über Sediment) bei einer Rammenergie von 300 kJ.	74
Abbildung 46: Einzelereignispegel L_E bzw. SEL (Summenpegel) als Funktion der Schlagenergie und des Abstandes.....	75
Abbildung 47: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem in Abhängigkeit der gewählten Schlagenergie	77
Abbildung 48: Dazugehöriges Differenzspektrum der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).	77
Abbildung 49: Einzelereignispegel L_E bzw. SEL (Summenpegel) als Funktion der Hydrophönhöhe über Grund und des Abstandes zum Testpfahl bei den Rammungen ohne Schallminderungsmaßnahmen (Schlagenergie 300 kJ).....	79
Abbildung 50: Einzelereignispegel L_E bzw. SEL (Summenpegel) als Funktion des Abstandes zum Testpfahl bei den Rammungen ohne	

Schallminderungsmaßnahmen (Schlagenergie 300 kJ). Zusätzlich ist der nach Thiele & Schellenstede [4] zu erwartende (berechnete) Einzelereignispegel als Funktion des Abstandes mit dargestellt.....	81
Abbildung 51: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1 und MP3.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem für das IHC NMS System mit und ohne innenliegendem Blasenschleier	84
Abbildung 52: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition	84
Abbildung 53: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem für die Feuerwehrschauchmethode der Fa. Menck mit zwei unterschiedlichen Luftdrücken. 85	
Abbildung 54: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition.	85
Abbildung 55: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssysteme für den Little Bubble Curtain der Fa. Weyres	86
Abbildung 56: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).	86
Abbildung 57: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssysteme für die BeKa-Schale mit und ohne innenliegendem Blasenschleier der Fa. Weyres.....	87
Abbildung 58: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).	87
Abbildung 59: Dargestellt sind die Medianwerte der Terzspektren gemessen an den Messpositionen MP2.1, MP3.1 und MP4.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 375 m) mit und ohne Schallminderungssystem des Elmer Hydro Sound Dampers. Durch die (I – innerer Ring; M – mittlerer Ring; A – äußerer Ring) drei Ringe ergaben sich sieben Variationsmöglichkeiten.....	88

Abbildung 60: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition (jeweils Median über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1).....	88
Abbildung 61: Dargestellt sind die Schalldurchgangsdämpfung bzw. Differenzspektrum zwischen mit und ohne NMS (Medianwert über die Messpositionen MP1.1, MP2.1, MP3.1 und MP4.1) der getesteten Schallminderungsmaßnahmen im Überblick.....	90
Abbildung 62: Dargestellt sind die Terzspektren der Referenzkondition (ohne Schallminderungssystem) gemessen an der Messposition MP5 in unterschiedlichen Höhen (Hydrophönhöhe 1,8 m, 3,6 m, 5,4 m und 7,2 m; Abstand zum Pfahl 13 m).....	91
Abbildung 63: Dargestellt ist das Differenzspektrum (spektrale Schalldurchgangsdämpfung) für ein repräsentatives Schallminderungssystem (mit und ohne Schallminderungssystem) gemessen an der Messposition MP5 in unterschiedlichen Höhen (Hydrophönhöhe 1,8 m, 3,6 m, 5,4 m und 7,2 m; Abstand zum Pfahl 13 m).....	92
Abbildung 64: Dargestellt sind die der Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssystem für das IHC NMS System mit und ohne innenliegendem Blasenschleier.....	93
<i>Abbildung 65: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition.</i>	<i>93</i>
Abbildung 66: Dargestellt sind die Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssystem für die Feuerwehrschauchmethode der Fa. Menck mit zwei unterschiedlichen Luftdrücken	94
<i>Abbildung 67: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition.</i>	<i>94</i>
Abbildung 68: Dargestellt sind die Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssysteme für den Little Bubble Curtain der Fa. Weyres.....	95
Abbildung 69: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition	95
Abbildung 70: Dargestellt sind die Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne	

Schallminderungssysteme für die BeKa-Schale mit und ohne innenliegendem Blasenschleier der Fa. Weyres	96
Abbildung 71: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition	96
Abbildung 72: Dargestellt sind die Terzspektren gemessen an der Messposition MP5.1 (Hydrophönhöhe 1,8 m, Abstand zum Pfahl 13 m) mit und ohne Schallminderungssystem des Elmer Hydro Sound Dampers. Durch die (I – innerer Ring; M – mittlerer Ring; A – äußerer Ring) drei Ringe ergaben sich sieben Variationsmöglichkeiten.....	97
Abbildung 73: Dazugehöriges Differenzspektrum (Schalldurchgangsdämpfung) der jeweiligen Messkondition	97
Abbildung 74: Messpositionen und Abstände der IGB-TUBS-Hydrophone am Brodtener Pfahl	98
Abbildung 75: Gegenüberstellung der Signal-Zeitverläufe der Hydrophone H1 und H2 bei einem Referenzschlag mit 300 kNm am 4. Messtag.....	99
Abbildung 76: ermittelte SEL und L_{peak} für jeden Einzelschlag (H1 und H2) bei den Referenzschlägen am Messtag 4.....	100
Abbildung 77: Terzanalyse der Referenzschläge an den 4 Messtagen.....	102
Abbildung 78: Terzanalysen beim Einsatz des IHC-Systems (7 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 1)	103
Abbildung 79: Terzanalysen beim Einsatz des Menck-Systems (firehose, 1 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 2)	103
Abbildung 80: Terzanalysen beim Einsatz des Weyres-Systems (BeKa-Schale, 0 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 3).....	104
Abbildung 81: Terzanalysen beim Einsatz des HSD-Systems (3 Netze) und der Referenzmessung ohne Schallschutz	104
Abbildung 82: Dargestellt sind die Terzspektren in Entfernungen zwischen 500 m und 1.000 m Entfernung zum jeweiligen Pfahl während unterschiedlicher Rammarbeiten. Die dünnen farbigen Linien stellen jeweils Einzelmessungen dar, die dicken farbigen Linien kennzeichnen die Medianwerte.	109
Abbildung 83: Modellspektrum für einen Rammschlag im Fernfeld für Prognosezwecke. Das idealisierte Modellspektrum basiert auf mehreren Messungen bei diversen Rammaktivitäten der itap GmbH.....	110

- Abbildung 84: Zeitfunktion (Zeitsignale) eines Hydroschall-Rammimpulses in 750 m Abstand vom Testpfahl und in 1,8 m Entfernung zum Sediment bei einer verwendeten Rammenergie von 300 kJ. 111
- Abbildung 85: Zeitfunktion (Zeitsignale) des Geophons (Erschütterung) eines Rammimpulses in 13 m Abstand vom Testpfahl am Sediment bei einer verwendeten Rammenergie von 300 kJ. 112
- Abbildung 86: Dämpfung des Schwinggeschwindigkeitspegels (Erschütterungen im Sediment; in einem Abstand von 13 m zum Pfahl ohne und mit Schallminderungssystem an den vier Untersuchungstagen (MP5.5)). An den Tagen 1 und 2 wurde dieselbe Messposition verwendet. An den Tagen 3 und 4 sind die Positionen aufgrund der unterschiedlichen Lage des Stelzenpontons vor dem Pfahl verändert worden. (Eine Schwinggeschwindigkeit von 10 mm/s entspricht einem Schwinggeschwindigkeitspegel von 140 dB). 115
- Abbildung 87: Terzspektrum bei Rammarbeiten am Windpark Baltic II an einem Pfahl ohne und mit einem Schallminderungssystem (Blasenschleier). Die Spektren sind zu Beginn der Gründung (d. h. Einbringtiefe wenige Meter), in der Mitte und zum Ende der Gründung (d. h. kaum bzw. kein Vorschub bei Rammung) dargestellt. 117
- Abbildung 88: Erzielte Reduktionen Δ SEL mit dem IHC NMS an verschiedenen Standorten (Quelle: IHC, mit freundlicher Genehmigung) 118
- Abbildung 89: Frequenzabhängige Reduktion des Rammschalls durch verschiedene Schallminderungsmaßnahmen aus der Literatur [5], [9], [12] und aus dem vorliegenden Forschungsvorhaben 121
- Abbildung 90: Schematischer Versuchsaufbau am Beispiel des IHC NMS Systems. Der Schall wird von dem Pfahl abgestrahlt und durchläuft nacheinander die Medien Wasser, Stahl, Luft, Stahl und wieder Wasser. 124

13. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die wesentlichen verwendeten physikalischen Größen und Parameter sowie deren Einheiten.	11
Tabelle 2: Bodenverhältnisse am Testpfahl Brodten Ost.	27
Tabelle 3: Gewichte der Testsysteme und Vergleich mit einem 9 m Abschnitt des Testpfahles.....	54
Tabelle 4: Daten des Testpfahls.....	55
Tabelle 5: Verwendete Geräte.....	59
Tabelle 6: Geographische Lage der verwendeten Messpositionen und ihre Bezeichnungen	60
Tabelle 7: Ergebnisse der Rammenergiemessung für alle NMS [24]	63
Tabelle 8: Reihenfolge der untersuchten Schallminderungsmaßnahmen mit den jeweiligen Variationsmöglichkeiten.....	65
Tabelle 9: Zusammenstellung der erfolgten Messungen (☺ = korrekt; - = Messung nicht erfolgt).	67
Tabelle 10: Zusammenfassung der Schallminderungspotenziale der getesteten fünf Schallminderungssysteme inkl. Variationen. Zusätzlich sind der Einzelereignispegel (SEL) und der L_{peak} an der StUK 3 konformen Messposition MP1.1 dargestellt.	89
Tabelle 11: Gesamtergebnis der IGB-TUBS-Hydroschallmessungen im Nahfeld (Abstand = 6,0 m) bei einer Schlagenergie von 300 kNm	101
Tabelle 12: Zusammenfassung der Schallminderungspotenziale (Δ SEL) der getesteten fünf Schallminderungssysteme inkl. Variationen als Funktion des Abstands zwischen Pfahl und Messposition. Die Messungen im Fernfeld werden für Δ SEL Medianwerte über vier Messpositionen im Abstand zwischen 375 m und 750 m verwendet, im Nahfeld Einzelergebnisse	106
Tabelle 13: Zusammenfassung der Schallminderungspotenziale der getesteten fünf Schallminderungssysteme inkl. Variationen als Median über die Fernfeldmessungen (MP1.1 bis MP4.1). Zusätzlich sind die Minderungspotenziale ohne eine mögliche Bodenkopplung im Fernfeld im Frequenzbereich 125 Hz aufwärts und gemessen im Nahfeld an der Position MP5.1 dargestellt	116

14. APPENDIX 1: Schallprognose Itap

Prognose des bei Rammversuchen am „Brodener Pfahl“ entstehenden Unterwasserschalls

Mai 2011

Aufgestellt von:

Klaus Betke, Rainer Matuschek (itap Institut für technische und angewandte Physik GmbH)

Inhalt

1. Aufgabenstellung und Zusammenfassung	Seite 2
2. Örtliche und technische Gegebenheiten	3
3. Vorgehensweise	4
3.1 Schallausbreitung	4
3.2 Quellpegel	6
4. Ergebnisse	7
4.1 Schallpegel in Abhängigkeit von der Entfernung	7
4.2 Kumulativer Effekt	9
4.3 Wirkung auf Personen im Wasser	10
5. Literatur	12

1. Aufgabenstellung und Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung (ESRa)* sollen verschiedene Verfahren zur Minderung des Unterwasserschalls bei Offshore-Rammarbeiten untersucht werden. Dazu ist beabsichtigt, Rammversuche an einem Testpfahl in der Lübecker Bucht vorzunehmen. Bei derartigen Rammarbeiten entstehen unter Wasser laute Geräusche, die einen Einfluss die Meeresfauna haben können. BioConsultSH wurde damit beauftragt, diesen Einfluss zu beurteilen. Vom itap wurden dafür die zu erwartenden Schallpegel berechnet.

Exemplarisch wurden zwei Ausbreitungswege zum Ufer und einer in Richtung offene See untersucht. Der sog. UBA-Vorsorgewert – ein Einzelereignispegel (SEL) eines Rammschlags von 160 dB re 1 μ Pa – wird danach in der Exemplarisch wurden zwei Ausbreitungswege zum Ufer und einer in Richtung offene See untersucht. Der sog. UBA-Vorsorgewert ein Einzelereignispegel (SEL) eines Rammschlags von 160 dB re

1 μPa wird danach in der ungünstigsten Richtung in 1,5 km bis 2 km Entfernung vom Pfahl unterschritten. Am Brodtener Ufer liegt der SEL in 2 m Wassertiefe bei 140 dB re 1 μPa oder weniger. Bei Barendorf (Mecklenburg Vorpommern) ist der prognostizierte SEL höher und sinkt erst 200 bis 300 m vor der Küstenlinie auf unter 150 dB re 1 μPa . Darüber liegt er bis zu einem Abstand von ca. 3 km vom Ufer annähernd konstant bei 150 bis 155 dB re 1 μPa .

2. Örtliche und technische Gegebenheiten

Der Testpfahl befindet sich in der Lübecker Bucht bei E in der Nähe von Travemünde, etwa 2,4 km nordöstlich vom Brodtener Ufer (Bild 1, Bild 2). Er wurde von der Menck GmbH in den 1980er Jahren errichtet, um Rammgeräte zu testen. Die Wassertiefe beträgt am Standort etwa 8 m. Der Pfahl ist ein Stahlrohr mit 2,2 m Durchmesser und 50 mm Wanddicke. Er ragt 5,5 m aus dem Wasser, die Einbindetiefe im Meeresboden beträgt nach Auskunft von Menck mehr als 60 m. Ein weiteres Eindringen in den Boden durch Rammschläge ist nicht oder kaum zu erwarten. Für die Versuche ist eine Ramme vom Typ Menck MHU 270T mit einer maximalen Schlagenergie von 300 kJ vorgesehen.



Bild 1. Der Testpfahl in der Nähe von Travemünde. Die weiße Haube dient der besseren Sichtbarkeit für die Schifffahrt und wird für Rammversuche abgenommen (Fotos vom Herbst 2005).



Bild 2. Geografische Position des Testpfahls. Die roten Linien geben die Richtungen an, für die exemplarisch die Schallausbreitung berechnet wurde, siehe Abschnitte 3 und 4

3. Vorgehensweise

Die zu erwartenden Schallpegel wurden exemplarisch für drei Ausbreitungswege berechnet, die in Bild 2 eingezeichnet sind:

1. Richtung Brodtener Ufer, 235°, Entfernung zum Ufer 2,4 km
2. Richtung Barendorf, 135°, Entfernung zum Ufer 3,9 km
3. Richtung offene See, 55°

Für Profil 1 und 2 wurde der Schallpegel in 2 m Wassertiefe berechnet, für Profil 3 in 8 m.

3.1 Schallausbreitung

Für die Berechnung wurde das Modell *Range-dependent Wassertiefen Acoustic Model RAM* benutzt, das von Michael D. Collins für das U.S. Naval Research Laboratory in Washington entwickelt (z.B. Collins & Westwood 1991, Collins et al. 1996). Es arbeitet nach der Methode der sog. parabolischen Gleichung (parabolic equation, PE). Der Programmcode ist frei verfügbar. Die verwendeten Tiefenprofile sind in Bild 3 dargestellt; die ungefähren Wassertiefen wurden aus den Seekarten 35 („Neustädter Bucht“) und 37 („Dahmeshöved bis Wismar“) abgelesen. Für die letzten 200 bis 300 m der Schallausbreitung zwischen der 2-m-Linie und dem Ufer wurde eine konstante Wassertiefe von 2 m angesetzt. Da der breitbandige Pegel von Rammschall weitgehend durch dessen tieffrequente Komponenten unter 1000 Hz bestimmt wird, wurde in den Oktavfrequenzbändern 125 Hz bis 2000 Hz gerechnet. Weiter wurde eine konstante Schallgeschwindigkeit über der Wassertiefe von 1485 m/s angenommen und ein über den Ausbreitungsweg konstantes Sediment, charakterisiert durch eine Schallgeschwindigkeit von 1600 m/s.

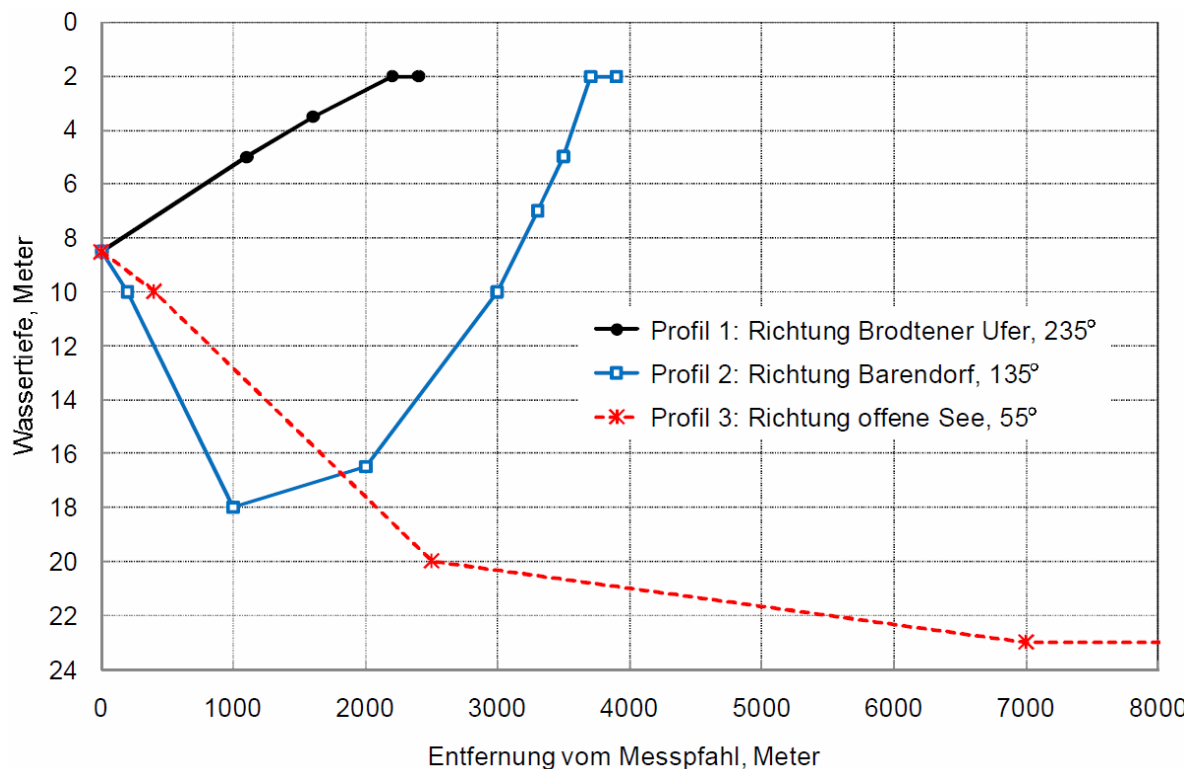


Bild 3. Für die Berechnung der Schallausbreitung angenommene Wassertiefen

Außer mit der PE wurde auch mit der „Thiele-Formel“

$$TL = (16.07 + 0.185 F) (\lg (R) + 3) + (0.174 + 0.046 F + 0.005 F^2) R$$

gerechnet, hierin ist TL die Ausbreitungsdämpfung in dB, $F = 10 \log(f / \text{kHz})$ und R die Entfernung in km. TL bezieht sich auf einen Abstand von 1 m von der punktförmig gedachten Schallquelle, d.h. für $R = 1 \text{ m}$ ist $TL = 0 \text{ dB}$. Diese Näherungsformel für die Schallausbreitung basiert auf Messungen von Thiele und Schellstede (1980) in bestimmten Gebieten der Nordsee und gilt strenggenommen auch nur dort und nur für winterliche Bedingungen mit guter Durchmischung des Wassers ohne ausgeprägtes Schallgeschwindigkeitsprofil. Die Formel wird jedoch gerne auch für andere Gebiete zu Vergleichen und für überschlägige Berechnungen herangezogen.

3.2 Quellpegel

Ausgehend von vorliegenden Messungen von Unterwasser-Rammschall in der Nordsee wurde für den Pfahldurchmesser von 2,2 m und eine Schlagenergie von 300 kJ ein breitbandiger SEL eines Rammschlags von 168 dB re 1 μPa in 750 m Entfernung angesetzt. Für die Ausbreitungsrechnung wird als Zwischengröße der Quellpegel, also der Wert in einer fiktiven Entfernung von 1 m, benötigt. Dieser wurde mit Hilfe der Thiele-Formel berechnet und ist für die betrachteten Frequenzbänder in Tabelle 1 aufgelistet. Dabei wurde die idealisierte Form des Spektrums in Bild 4 angenommen.

Oktavband, Hz	125	250	500	1000	2000	Summe
SEL in 750 m, dB re 1 μPa	163.7	163.7	160.9	149.1	142.0	168.0
SEL in 1 m dB re 1 μPa	205.3	206.8	205.3	195.2	190.0	210.8

Tabelle 1. Für die Prognose benutzte frequenzabhängige Quellpegel des Rammschalls, basierend auf einem breitbandigen Wert von 168 dB re 1 μPa in 750 m Entfernung von der Ramme

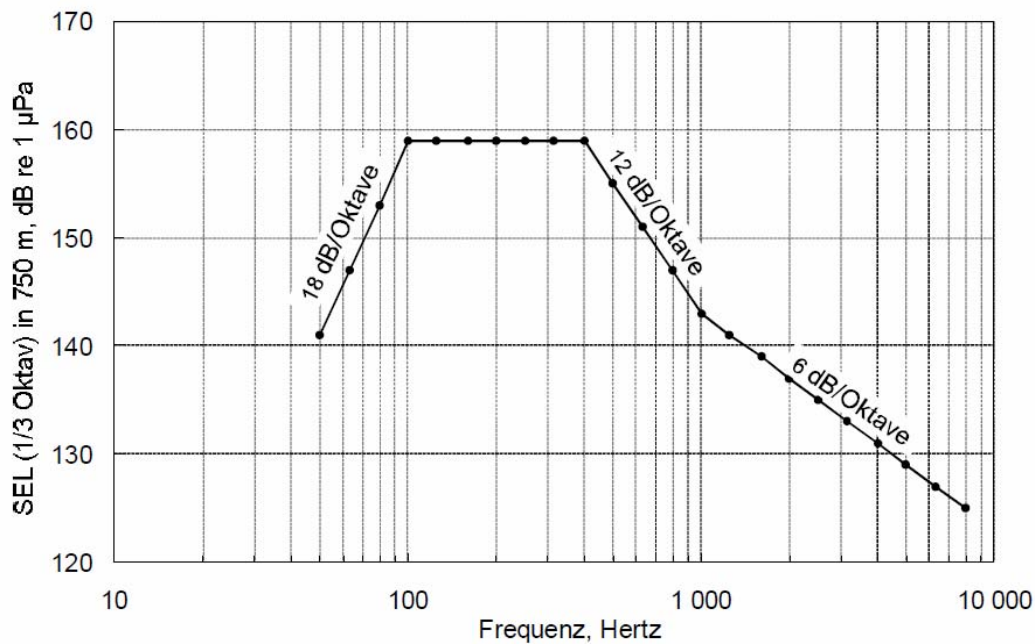


Bild 3. Für die Berechnung der Schallausbreitung angesetzttes Modellspektrum eines Rammschlags

4. Ergebnisse

4.1 Schallpegel in Abhängigkeit von der Entfernung

Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung nach dem PE-Modell für die Pfade 1 und 2. Dargestellt ist der Einzelereignispegel (SEL) eines Rammschlags an einem Empfänger in 2 m Tiefe. In westlicher Richtung (Pfad 1) nimmt der Schallpegel kontinuierlich ab; in der Nähe von Brodten sinkt der SEL 700 m von der Küstenlinie unter 150 dB re 1 µPa. Zum Strand hin sinkt er dann weiter auf etwa 130 dB re 1 µPa. In Richtung Südost (135°) nimmt der Schallpegel auf den ersten 1000 Metern vom Rammpfahl zunächst ähnlich stark ab, bleibt dann aber bis 3500 m bei 150 bis 155 dB re 1 µPa und sinkt erst 200 bis 300 m vor der Küstenlinie auf unter 150 dB re 1 µPa.

Die genannten Pegel nehmen zur Wasseroberfläche hin ab, wenn also die Empfängertiefe kleiner als 2 m ist. Mit steigender Tiefe steigt der Pegel dagegen leicht an, in 8 m Tiefe um etwa 3 dB gegenüber dem Wert in 2 m Tiefe.

In Richtung auf die offene See (Pfad 3, Bild 6) nimmt der Schallpegel mit wachsender Entfernung von der Ramme stetig ab. Der Berechnung zufolge wird der vom Umweltbundesamt entwickelte Vorsorgewert von 160 dB re 1 µPa in rund 1,6 km un-

terschritten.

In Bild 5 und 6 ist zum Vergleich auch das Ergebnis der einfachen Rechnung mit der Thiele-Formel eingezeichnet. Da diese keine Wassertiefenprofile berücksichtigt, kann sie für die Strecken in Richtung Küste keine realitätsnahen Werte liefern. Für Richtung 3 stellt sie dagegen bis etwa 2 km Entfernung eine brauchbare Näherung dar.

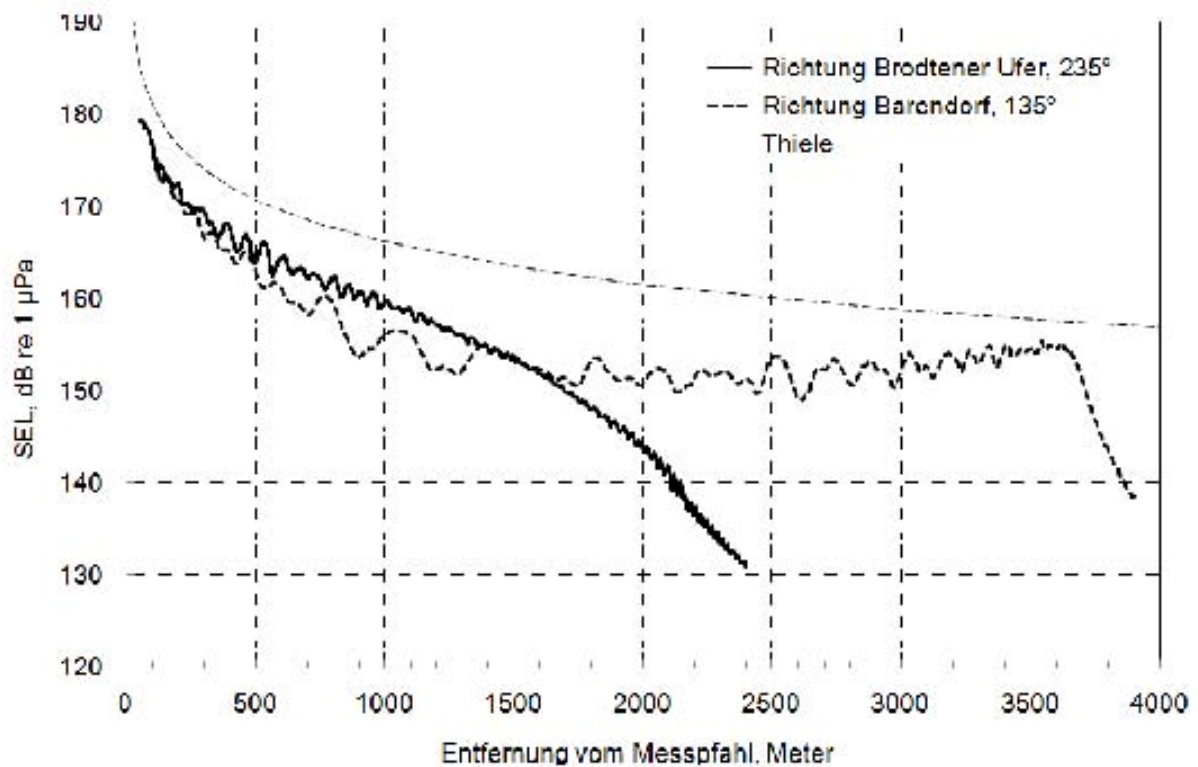


Bild 5. Prognostizierter Einzelereignispegel in 2 m Tiefe entlang der Strecken 1 und 2

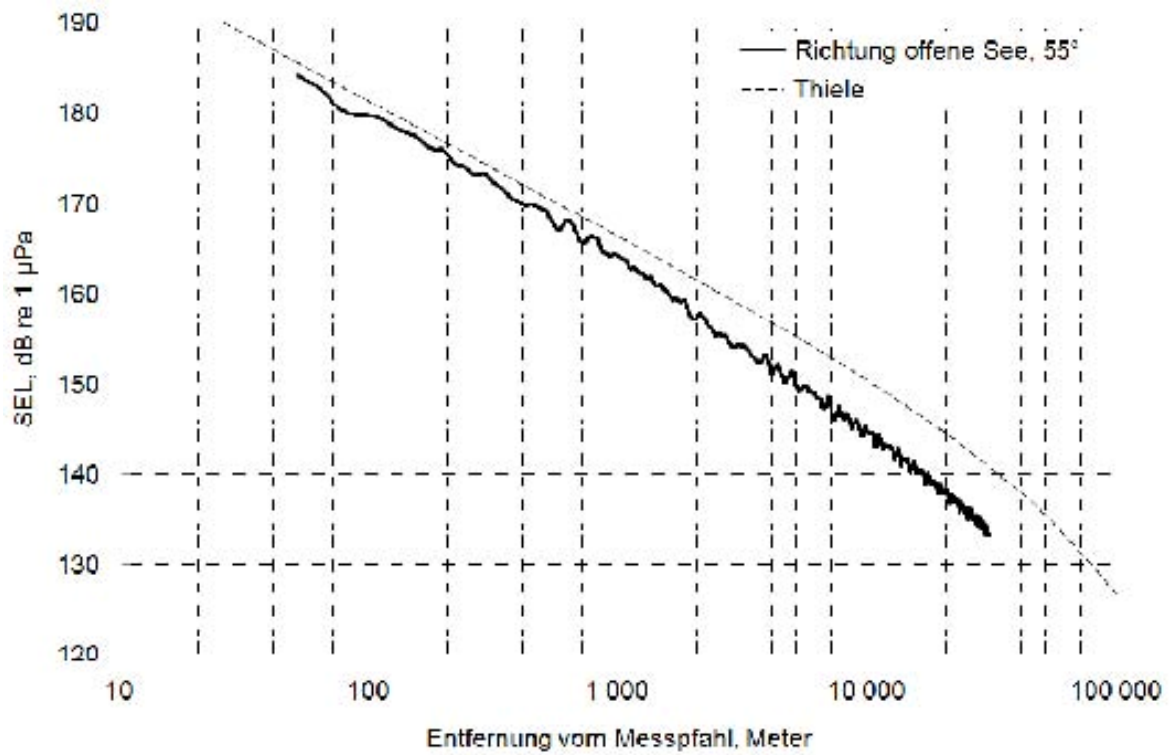


Bild 6. Prognostizierter Einzelereignispegel in 8 m Tiefe in nordöstlicher Richtung vom Pfahl

4.2 Kumulativer Effekt

Für die biologische Wirkung von Rammschall ist nicht nur der Pegel eines einzelnen Schlages maßgeblich, sondern auch die Einwirkdauer bzw. die Anzahl der Schläge. Exakte Aussagen zur Rammdauer sind wegen des experimentellen Charakters der Arbeiten nicht möglich. Zu rechnen ist mit Schlagfolgen von jeweils einigen Minuten bzw. einigen 10 Schlägen, während derer der Schall gemessen wird, und längeren Umbauphasen davor und danach.

Zumindest für das Auftreten einer Schädigung des Gehörs, gekennzeichnet durch eine bleibende Hörschwellenanhebung (PTS, permanent threshold shift), aber auch für eine vorübergehende Hörschwellenanhebung (TTS, temporary threshold shift), werden in der Literatur Schallwerte für den „kumulativen SEL“ angegeben. (Southall et al. 2007). Beim kumulativen SEL wird als „Ereignis“ nicht ein einzelner Schallimpuls, sondern eine Folge von Impulsen betrachtet. Aus dem Wert SEL_{single} für einen einzelnen Rammschlag ergibt er sich gemäß

$$SEL_{\text{cum}} = SEL_{\text{single}} + 10 \lg(N),$$

wobei N die Anzahl der Rammschläge ist. In Bild 7 sind Werte für $N = 1$ (das ist die Kurve aus Bild 6), $N = 10$ und $N = 100$ dargestellt, die nach der Gleichung um 10 dB bzw. 20 dB gegenüber der Kurve für $N = 1$ Rammschlag erhöht sind.

In diesem Zusammenhang wurde von Southall et al. außerdem die sog. M-Gewichtung vorgeschlagen, eine Frequenzgewichtung, die es ähnlich der bekannten A-Gewichtung für Luftschall ermöglichen soll, Einzahlwerte für den Schallpegel zu berechnen und dabei gleichzeitig die Frequenzabhängigkeit des Hörvermögens zu berücksichtigen. Die M-Gewichtung schwächt vor allem tiefe Frequenzen ab, so dass M-gewichtete Rammschallpegel etwas niedriger sind als ungewichtete Pegel. Dies ist ebenfalls aus Bild 7 ersichtlich. Von Southall et al. werden mehrere leicht unterschiedliche M-Gewichtungen angegeben. Hier wurde die Kurve M_{HF} für „high-frequency cetaceans“ benutzt, zu denen Schweinswale zählen. Die Gewichtung schwächt Schallanteile unterhalb einer Frequenz von etwa 200 Hz ab.

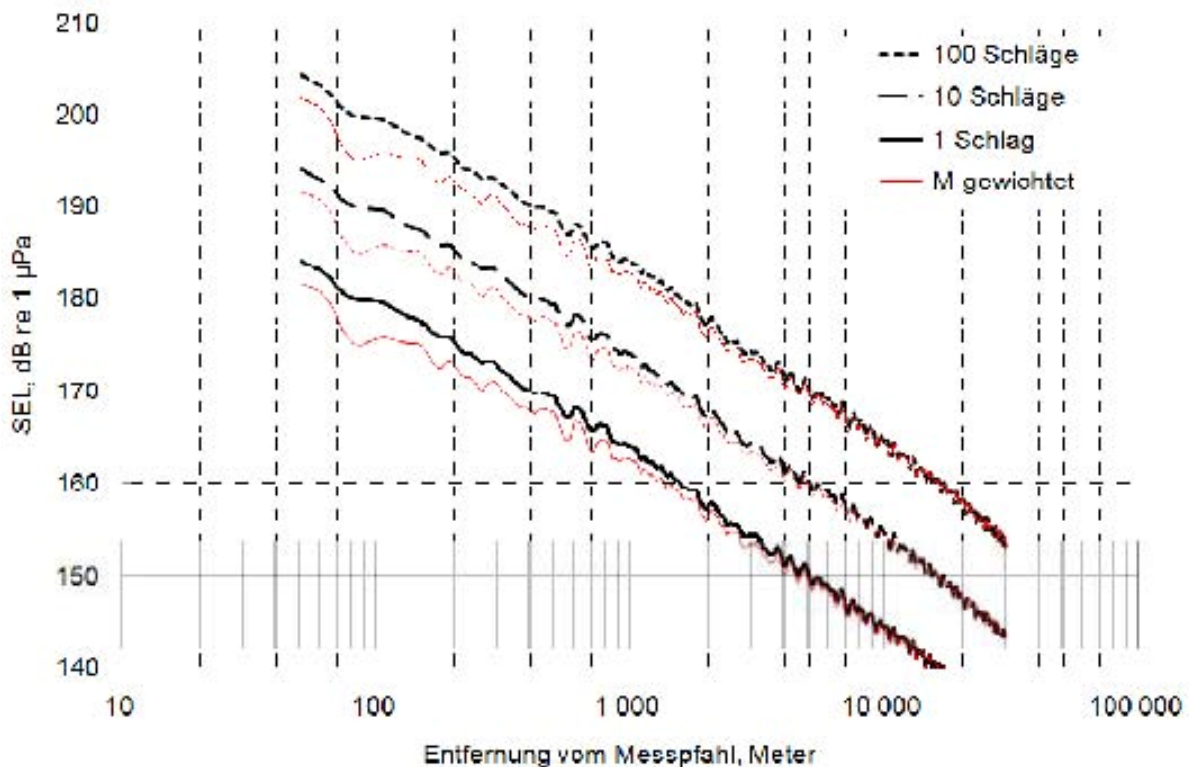


Bild 7. Prognostizierte kumulative SEL in 8 m Tiefe in nordöstlicher Richtung vom Pfahl für Folgen aus 10 und 100 Rammschlägen (die Kurve für 1 Schlag ist die gleiche wie in Bild 5)

Für eine Folge von 10 Schlägen wird der TTS-Schwellwert von 183 dB re 1 μ Pa (M-gewichtet) demnach in 100 bis 200 m von der Ramme erreicht bzw. unterschritten, für eine Folge von 100 Schlägen in rund 1 km. Unklarheit besteht allerdings insofern, als Southall et al. TTS zu den Verhaltensreaktionen („behavioral disturbance“) zählen und für diese die kumulative Berechnungsmethode mit einer Zunahme des Pegels um $10 \lg(N)$ nicht adäquat sei.

4.3 Einfluss auf Personen im Wasser

Angaben zur Wirkung von Unterwasserschall auf Menschen sind in der Literatur kaum zu finden. Es existieren einige Richtlinien für Taucher, etwa vom *NATO Undersea Research Centre NURC*. Ainslie (2008) hat einige solcher Sicherheitsregeln evaluiert und festgestellt, dass die als kritisch eingeschätzten Schallpegel sich teilweise stark unterscheiden. Ferner ist unklar, auf welchen Mittelungszeiten usw. die Werte basieren.

Ainslie kommt zu dem Ergebnis, dass im Frequenzbereich 125 Hz bis 4 kHz ein Pegel von 160 dB re 1 μ Pa nicht überschritten werden sollte, wobei dieser Pegel über

125 ms gemittelt sein soll, was etwa die Zeitkonstante der Lautstärkebildung des menschlichen Gehörs ist. Die Zahl soll für Marinetaucher gelten; für nicht vorgewarn- te Freizeittaucher sei eventuell ein niedrigerer Wert sinnvoll.

Gedacht sei der Wert für Sonarsignale oder ähnliches, ausdrücklich nicht jedoch für kurze Impulse wie Rammgeräusche. Einige Überlegungen sind jedoch möglich. Der SEL eines Schallereignisses ist definiert als der Pegel eines kontinuierlichen Ge- räuschs von 1 s Dauer, das den gleichen Energieinhalt hat wie das Schallereignis. Ein Rammschlag ist aber viel kürzer als 1 s, meist auch kürzer als 125 ms, so dass der L_{eq} (äquivalenter Dauerschallpegel) mit 125 ms Mittelungszeit bei einem Ramm- schlag bis zu

$$L_{eq\ 125ms} = SEL + 10\lg(1\text{ s}/0.125\text{ s})\text{dB} \approx SEL + 9\text{ dB}$$

betragen, also 9 dB höher sein kann als der SEL. Der genannte Vorsorgewert würde also einem SEL eines einzelnen Rammschlages von 151 dB re 1 μPa entsprechen. Wie Bild 4 zeigt, kann dieser Wert beispielsweise vor Barendorf in einigen 100 Me- tern Entfernung vom Ufer erreicht werden. Allerdings tritt dieser Wert nur kurzzeitig mit der Schlagfolge der Ramme auf. Eine Beurteilungsgrundlage für solche wieder- holten Unterwasser-Schallimpulse ist nicht bekannt.

5. Literatur

Ainslie MA (2008): Review of published safety thresholds for human divers exposed to underwater sound. TNO report TNO-DV 2007 A598. Nederlandse Organisatie voor toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek, April 2008

Collins MD, Westwood EK (1991): A higher-order energy-conserving parabolic equation for range-dependent ocean depth sound speed and density. *J. Acoust. Soc. Am.* 89, 1068-1075

Collins MD, Cederberg RJ, King DB, Chin-Bing SA (1996): Comparison of Algorithms for Solving Parabolic Wave Equations. *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 178-182

Collins MD, User's guide for RAM versions 1.0 and 1.0p. U.S. Naval Research Laboratory, Washington

Southall BA, Bowles AE, Ellison WT, Finneran JJ, Gentry RL, Greene Jr CR, Kastak D, Ketten DR, Miller JH, Nachtigall PE, Richardson WJ, Thomas JA, Tyac PL (2007): Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* 33, 411-522

Thiele R, Schellstede G (1980): Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7, Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik

15. APPENDIX 2: Nahbereichsmessungen TUBS

Energie- und Hydroschallmessungen im Nahbereich des Pfahles beim Forschungsprojekt ESra

Februar 2012

Aufgestellt von:

Dr.-Ing. Jörg Gattermann, Dipl.-Ing. Benedikt Bruns, Dipl.-Ing. Christian Kuhn, Dipl.-
Ing. Jörn Zahlmann (IGB-TUBS)
Dr.-Ing. Karl-Heinz Elmer (Neustadt a. Rbg.)



Bestimmung der eingeleiteten Energie

Beim Projekt ESRa wurden während der Tests rambbegleitend dynamische Probelastungen zur Erfassung der in den Pfahl eingeleiteten Energie durchgeführt. Die Messungen dienen dem Nachweis der Vergleichbarkeit der Tests.

Bei einer dynamischen Probelastung werden die durch den Hammerschlag erzeugten Dehnungen und Beschleunigungen unterhalb des Pfahlkopfes gemessen. Mit diesen zwei Messgrößen ist es möglich, die eingeleitete Energie in der Ebene der Messaufnahme zu bestimmen. Die folgende Abbildung 1 vermittelt einen Eindruck der applizierten Sensoren am Brodtener Pfahl.



Abbildung 1: Messposition von Beschleunigungs- (rechts) und Dehnungssensor (links) am Brodtener Pfahl

Die Tests am Brodtener Pfahl sahen jeweils 3 Schlagserien mit Schlagenergien von 100, 200 und 300 kNm vor. Jede Schlagserie bestand aus 20 Einzelschlägen. Nach diesem Schema wurde jedes eingesetzte Schallschutzsystem (NMS, Noise Mitigation System) und jeweils eine Referenzmessung ohne Schallschutzsystem untersucht. Diese unterschiedlichen NMS werden in diesem Bericht nicht näher beschrieben. Die nachfolgenden Abbildungen 2 bis 5 zeigen eine graphische Zusammenfassung der durch die gemessene Dehnung und Beschleunigung errechneten Energie am Pfahlkopf. Es ist jeweils die Energie über die Anzahl der Schläge dargestellt. Die zwei Schläge mit einer Energie von ca. 25 kNm waren die Pre-Blows und dienten zum Vertreiben von Meereslebewesen im Bereich um den Brodtener Pfahl jeweils zu Beginn der Tests.

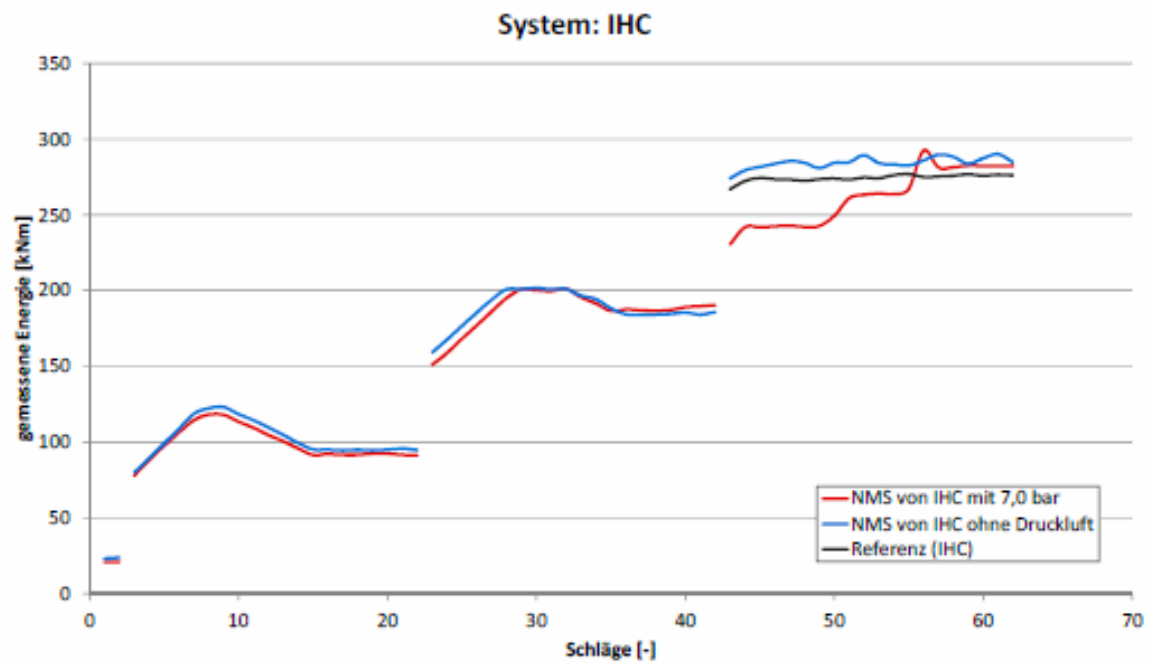


Abbildung 2: eingeleitete Schlagenergien beim System IHC (Messtag 1)

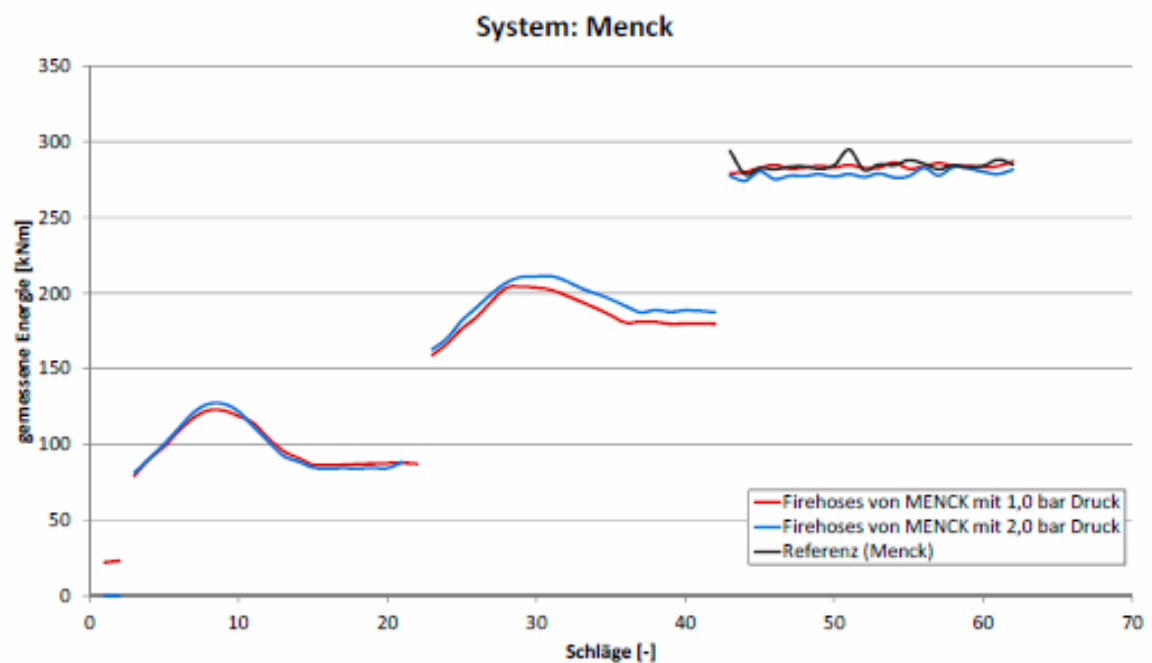


Abbildung 3: eingeleitete Schlagenergien beim System Menck (Messtag 2)

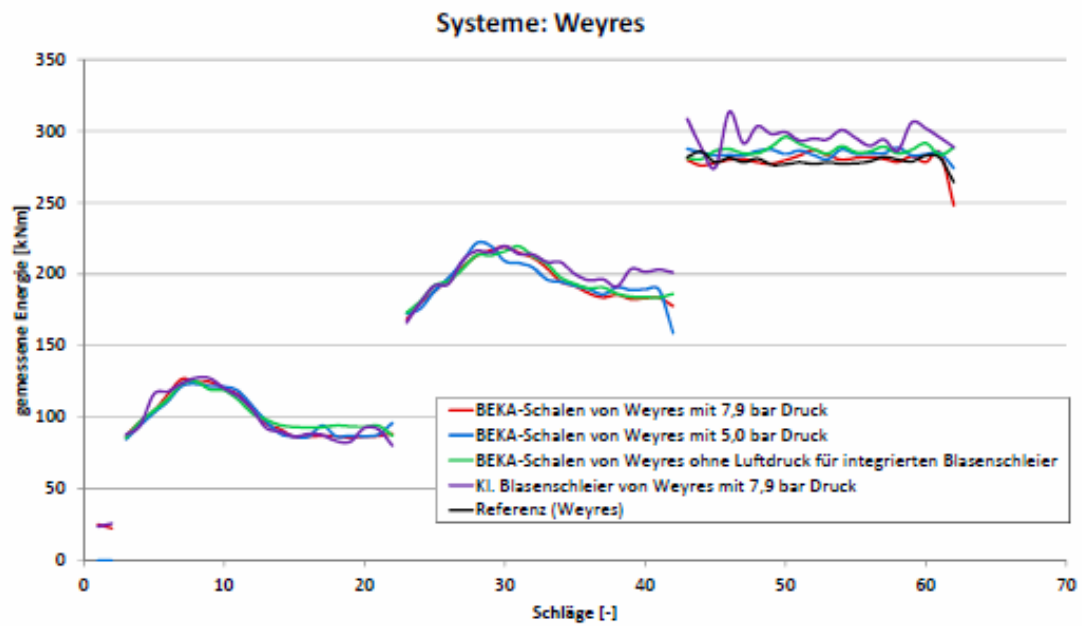


Abbildung 4: eingeleitete Schlagenergien bei den Systemen Weyres (Messtag 3)

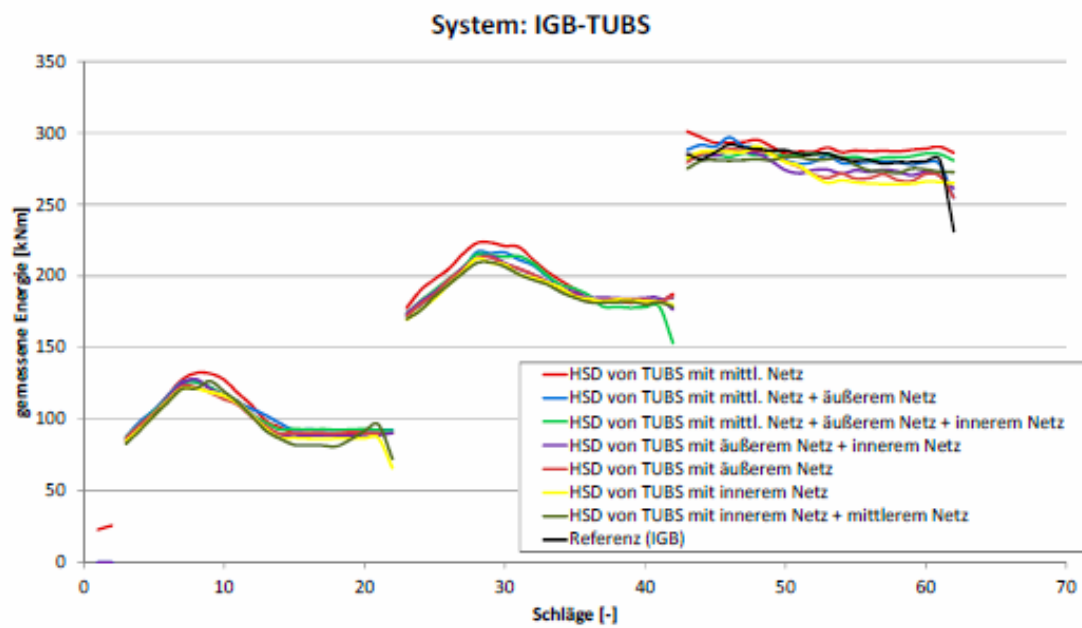


Abbildung 5: eingeleitete Schlagenergien beim System Hydroschalldämpfer (HSD) (Messtag 4)

Hydroschallmessungen

Eingesetztes Messequipment und Messpositionen

Die Hydroschallmessungen wurden vom IGB-TUBS an allen 4 Messtagen an ähnlicher Position durchgeführt. Das für die Messungen eingesetzte Messsystem wurde von der Firma Bruel & Kjaer hergestellt und besteht für diese Anwendung aus zwei Hydrophonen vom Typ 8103. Diese sind über einen Nexus Signalkonditionierer (Typ 26920S2) mit einem LanXI Modul (3052-B-3/0) verbunden. Die Steuerung dieses Moduls geschieht mit einem Laptop, auf dem sämtliche Messdaten als Schalldruck in

Pascal gespeichert werden. Die Abtastrate der Hydrophon betrug 65.536 Hz. Die Messungen wurden an einer Position in ca. sechs Meter Entfernung zum Brodtener Pfahl in unterschiedlichen Tiefen (H1 in 6 m Tiefe, H2 in 4 m Tiefe) durchgeführt (siehe Abbildung 6). Aufgrund der geringen Distanz zwischen dem Brodtener Pfahl und den Hydrophonen können die Messungen als Nahfeldmessungen bezeichnet werden.

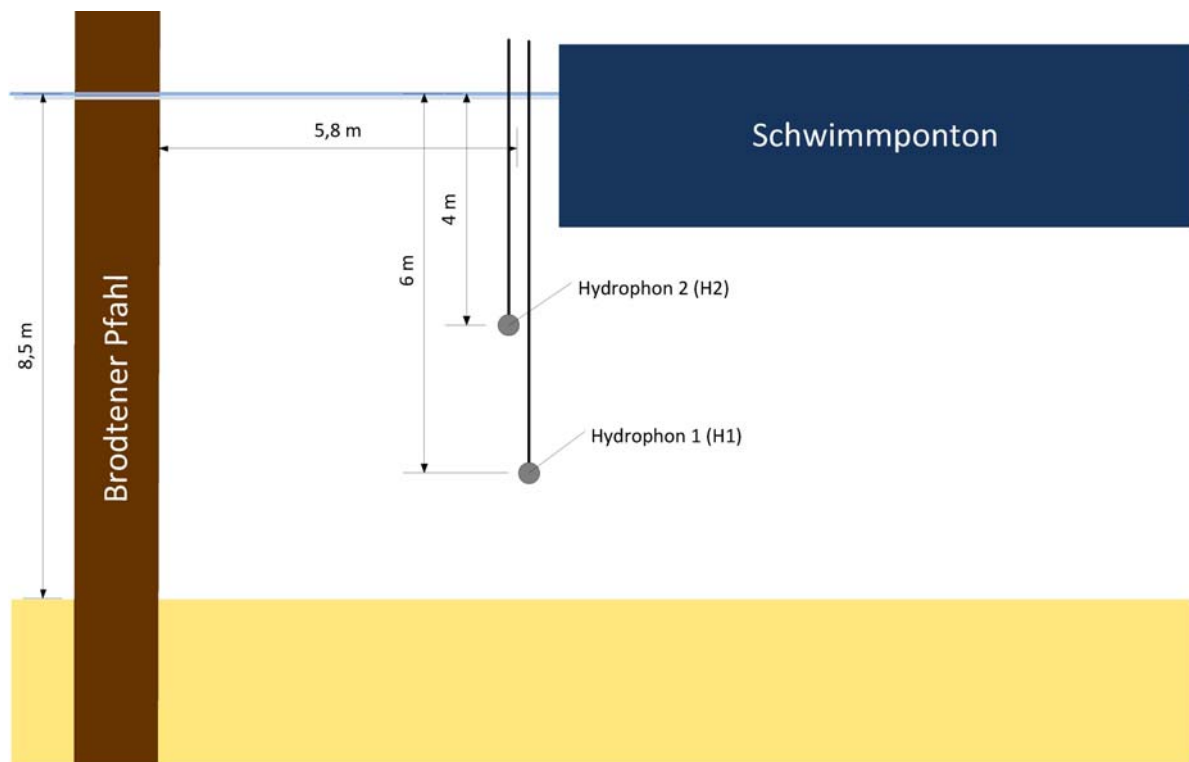


Abbildung 6: Messpositionen und Abstände der IGB-TUBS-Hydrophone am Brodtener Pfahl

Auswertungsprinzip der Hydroschallmessungen

Bei jedem Schallminderungs-System wurde die Schalldämpfungswirkung bei jeweils 3 Schlagserien (100, 200 und 300 kNm Schlagenergie) getestet. Jede Schlagserie bestand aus 20 Einzelschlägen. Die im Folgenden dargestellten Hydroschall-Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Schlagserien mit einer Schlagenergie von 300 kNm, da nur bei dieser Schlagenergie bei allen eingesetzten NMS auch Referenzschläge ohne NMS existieren.

Aus den aufgezeichneten Signalverläufen wurde jeder der 20 Einzelschläge der Schlagserie auf einer Länge von 0,12 Sekunden ausgeschnitten. Beispielhaft sind in Abbildung 7 die Signal-Zeitverläufe der Hydrophone H1 und H2 bei einem Referenzschlag mit 300 kNm Schlagenergie dargestellt, die am Messtag 4 aufgenommen wurden. Es ist deutlich der Schlagimpuls des Hammers nach etwa 4 Millisekunden zu erkennen, der sich als maximal positiver Schalldruck von ca. 120 kPa im Verlauf zeigt. Ein solcher Signalverlauf der Referenzschläge hat sich an allen Messtagen als charakteristisch gezeigt. Des Weiteren ist kein wesentlicher Unterschied zwischen den Hydrophonen H1 und H2 zu erkennen.

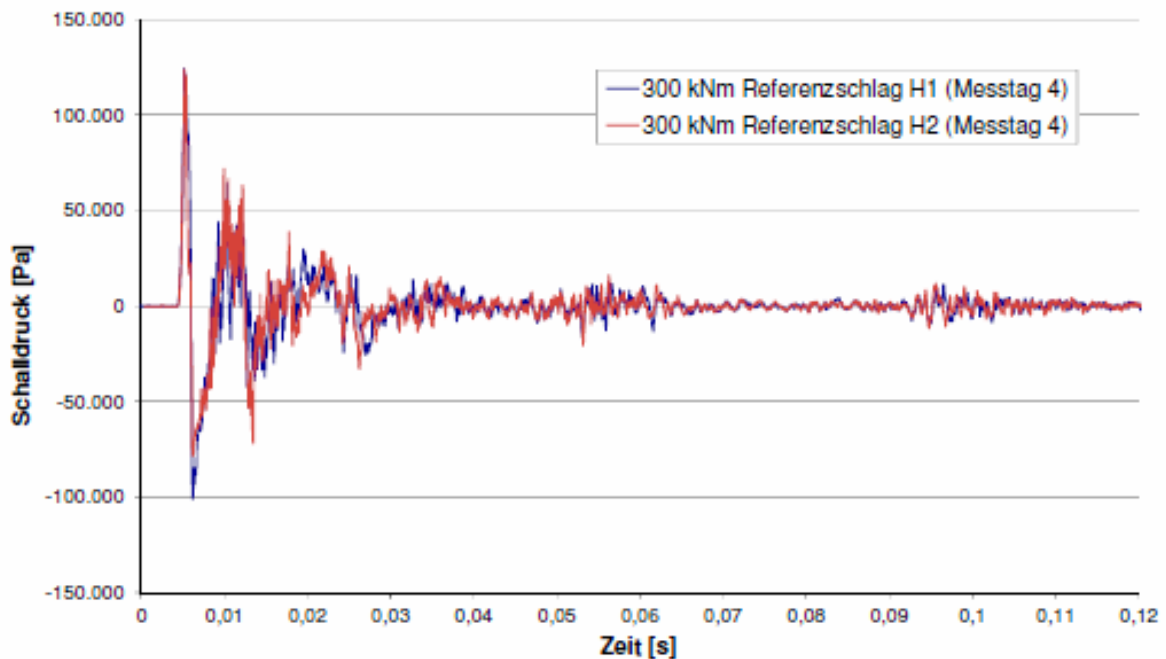


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Signal-Zeitverläufe der Hydrophone H1 und H2 bei einem Referenzschlag mit 300 kNm am 4. Messtag

Für jeden Einzelschlag wurde nach folgenden Gleichungen der SEL sowie der L_{Peak} ermittelt.

$$SEL = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{\rho_0^2} dt \right) \text{ [dB]}$$

$$L_{Peak} = 20 \log \left(\frac{|p_{Peak}|}{\rho_0} \right) \text{ [dB]}$$

Als Bezugswert p_0 für Wasserschall wurde der festgelegte Wert von $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ (dB re 1 μPa) eingesetzt.

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist getrennt für die Hydrophone H1 und H2 in folgender Abbildung für die Referenzschläge am Messtag 4 dargestellt. Es ergibt sich bei beiden Hydrophonen ein SEL von 194 dB und ein L_{Peak} von 222 dB. Dieses Diagramm spiegelt zudem die sehr gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der einzelnen Rammschläge wieder.

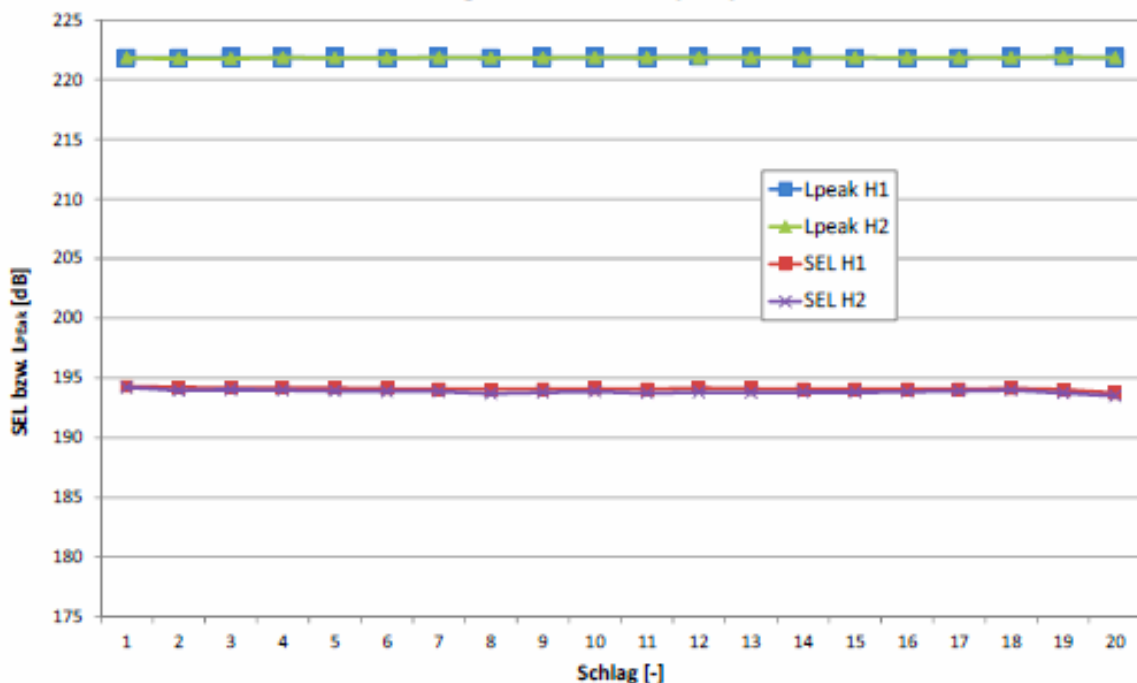


Abbildung 8: ermittelte SEL und L_{Peak} für jeden Einzelschlag (H1 und H2) bei den Referenzschlägen am Messtag 4

Ergebnisse der Hydroschallmessungen

Mit der zuvor beschriebenen Pegelbestimmung der Einzelschläge bei einer Schlagenergie von 300 kNm lässt sich eine Bewertung des Dämpfungspotentiales der einzelnen Systeme vornehmen. Diese Auswertung ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Aufgeführt sind die gemittelten Lärmpegel des Hydrophons H1, die aus den Einzelschlägen bestimmt wurden. Die Schallreduktion jedes Systems wurde auf die am gleichen Messtag durchgeführte Referenzmessung bezogen.

Tabelle 1: Gesamtergebnis der IGB-TUBS-Hydroschallmessungen im Nahfeld (Abstand = 6,0 m) bei einer Schlagenergie von 300 kNm

System	L _{Peak} [dB]	SEL [dB]	Reduktion L _{Peak} [dB]	Reduktion SEL [dB]
Testtag 1				
IHC NMS mit 7 bar	206,0	184,2	13,6	7,6
IHC NMS ohne Druckluft	206,0	184,8	13,6	7,0
IHC Referenz	219,7	191,8		
Testtag 2				
Menck Firehose 1bar	208,3	183,6	13,7	10,9
Menck Firehose 2bar	210,4	184,8	11,6	9,6
Menck Referenz	221,9	194,5		
Testtag 3				
Weyres kl. Blasenschleier	213,1	187,3	8,8	8,0
Weyres BEKA-Schalen 7,9bar	204,8	179,6	17,0	15,7
Weyres BEKA-Schalen 5,0bar	204,2	179,6	17,6	15,7
Weyres BEKA-Schalen ohne DL	204,1	179,3	17,8	15,9
Weyres Referenz	221,8	195,3		
Testtag 4				
HSD Mitte	216,3	186,1	5,6	8,0
HSD Mitte/Außen	213,9	183,3	7,9	10,8
HSD Innen/Mitte/Außen	211,2	180,7	10,7	13,4
HSD Innen/Außen	214,5	182,3	7,4	11,8
HSD Außen	216,0	184,7	5,9	9,5
HSD Innen	216,2	185,1	5,7	9,0
HSD Innen/Mitte	216,0	184,1	5,8	10,0
HSD Referenz	221,8	194,1		

Die Pegel der Referenzmessungen sind bei den Systemen Menck, Weyres und HSD (Messtage 2-4) annähernd identisch (ca. 222 dB). Nur beim IHC-System wurde ein um 2 dB geringerer Pegel gemessen. Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich ebenso bei der Auswertung der Terzanalyse der Referenzschläge (Abbildung 9). Auch dabei zeigt sich, dass der SEL in den einzelnen Terzen an den Messtagen 2 bis 4 sehr gut übereinstimmt.

Die Schallreduktion der einzelnen Systeme beträgt in 6 m Entfernung vom Pfahl zwischen 7,0 dB und 15,9 dB SEL.

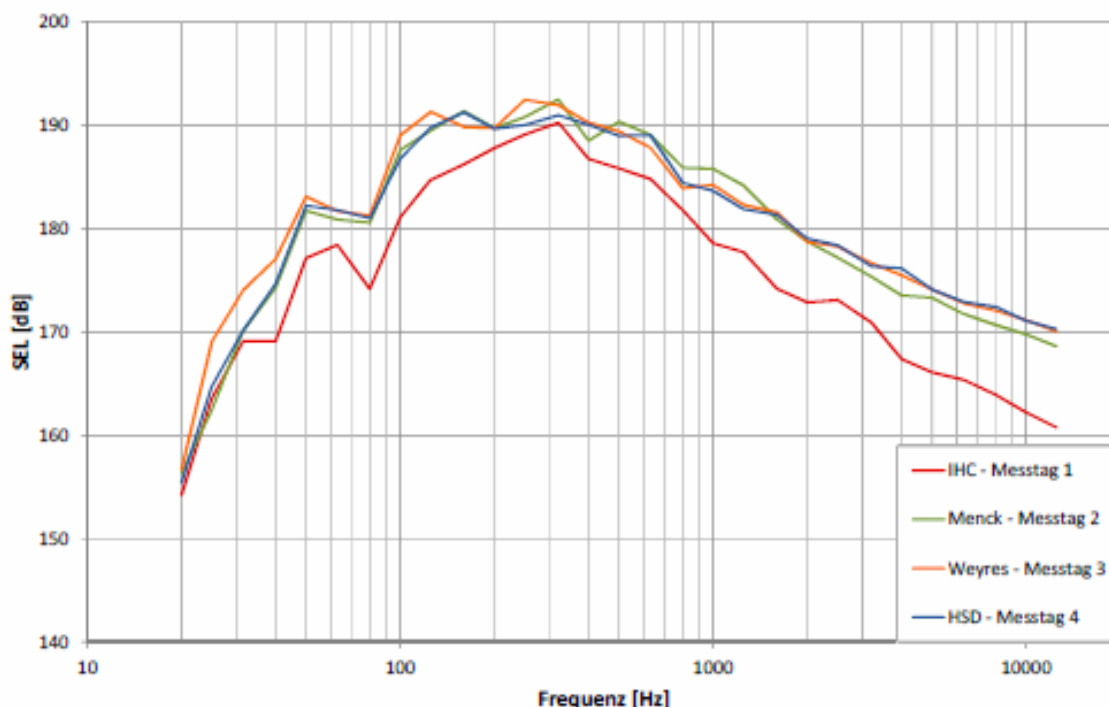


Abbildung 9: Terzanalyse der Referenzschläge an den 4 Messtagen

In den folgenden Abbildungen 10 bis 13 sind die Terzanalysen bei Anwendung der einzelnen Schallminderungssysteme im Vergleich zur jeweiligen Referenzmessung (ohne System) dargestellt. Der weiß hinterlegte Bereich markiert dabei die erzeugte Schallminderung bezogen auf die Terz. Bei den Systemen von IHC und Menck ergeben sich maximale Reduktionen von 20 dB bzw. 18 dB, bei den Beka-Schalen von Weyres 24 dB und beim System der Hydroschalldämpfer (HSD) 23 dB.

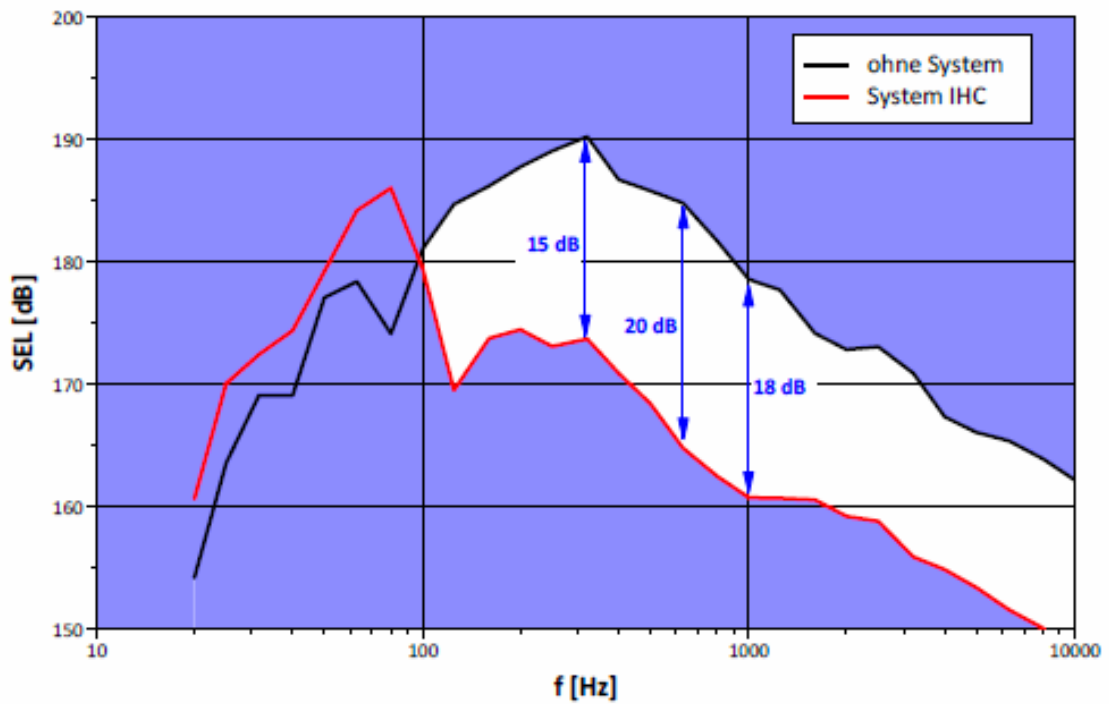


Abbildung 10: Terzanalysen beim Einsatz des IHC-Systems (7 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 1)

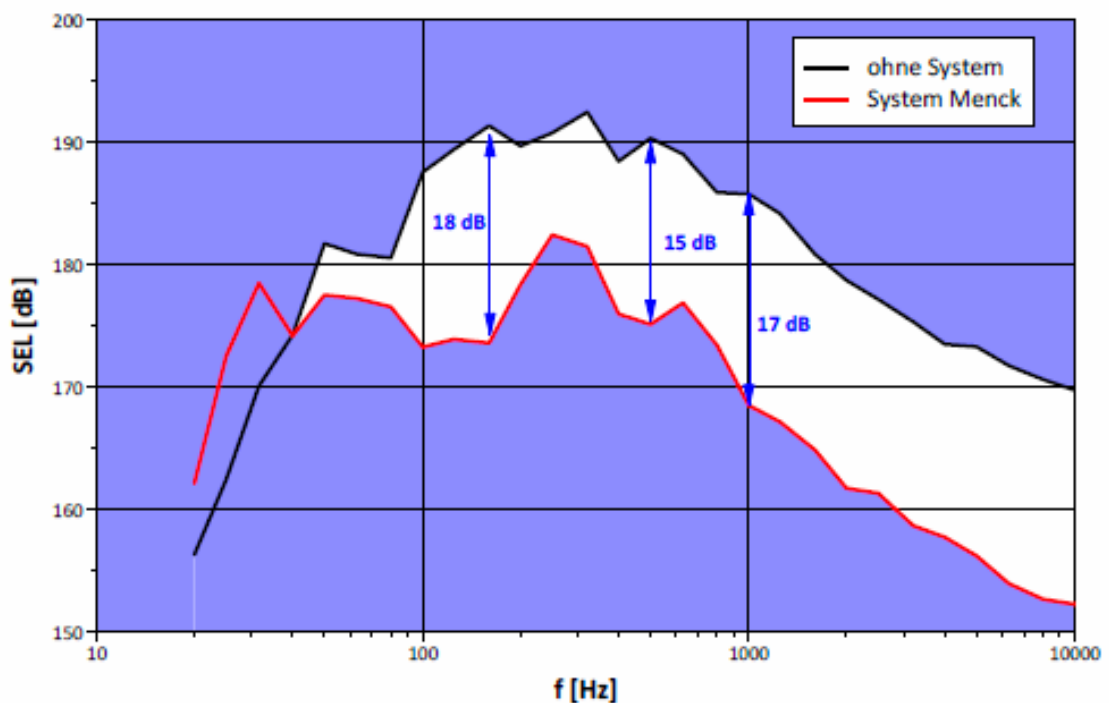


Abbildung 11: Terzanalysen beim Einsatz des Menck-Systems (Firehose, 1 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 2)

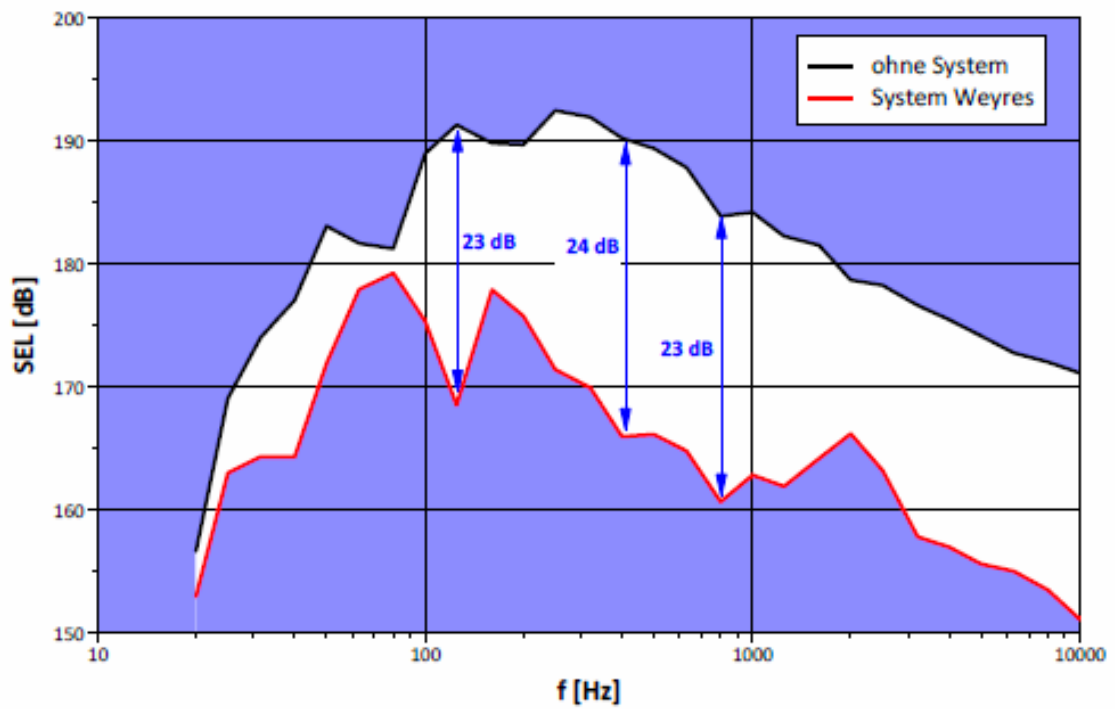


Abbildung 12: Terzanalysen beim Einsatz des Weyres-Systems (Beka-Schale, 0 bar) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 3)

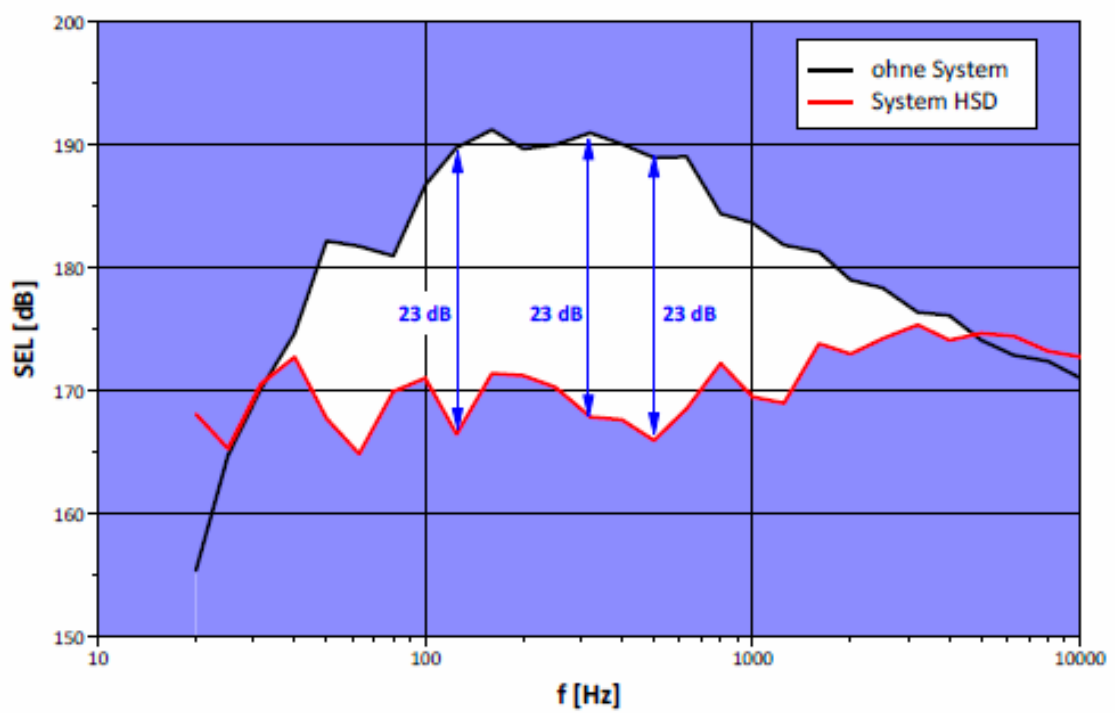


Abbildung 13: Terzanalysen beim Einsatz des HSD-Systems (3 Netze) und der Referenzmessung ohne Schallschutz (Messtag 4)

Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der Hydro-schallmessungen

Vom IGB-TUBS wurden während der Tests beim Projekt ESRa an 4 Messtagen Hydroschallmessungen in zwei unterschiedlichen Tiefen in einer Entfernung von ca. 6 m zum Brodtener Pfahl durchgeführt. Es wurden für alle Einzelschläge der Schlagserien mit einer Schlagenergie von 300 kNm die Spitzenpegel LPeak und Summenpegel SEL sowie die dazugehörigen Terzanalysen ermittelt. Dabei ergab sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit und damit auch Vergleichbarkeit der Messungen.

Das System IHC erzeugte breitbandige Schallreduktionen von 7 bis 8 dB (SEL) und ca. 14 dB im LPeak. Der zusätzliche Einsatz der Druckluft bewirkte eine Erhöhung der Dämpfungswirkung von ca. 0,6 dB (SEL). Der Vergleich der Terzanalyse ergibt eine Schallreduktion von maximal 20 dB bei ca. 600 Hz.

Beim System Menck schneidet die Beaufschlagung mit 1 bar Druckluft am besten ab. Die breitbandigen Schallreduktionen betragen knapp 11 dB (SEL) bzw. 14 dB (LPeak). Die Terzanalyse ergibt eine maximale Reduktion von 18 dB bei ca. 200 Hz.

Die Beka-Schalen der Firma Weyres haben Schallreduktionen von 16 dB (SEL) bzw. 18 dB (LPeak) erzeugt, wobei der Einsatz von Druckluft zu keiner wesentlichen Erhöhung führte. Die Terzanalyse ergibt maximale Reduktionen von ca. 23 bis 24 dB im Frequenzband zwischen 200 und 900 Hz. Der kleine Blasenschleier der Firma Weyres schneidet mit 8 dB (SEL) bzw. 9 dB (LPeak) vergleichsweise schlechter ab.

Die Hydroschalldämpfer erzeugen eine breitbandige Schallreduktion von 14 dB (SEL) bzw. 11 dB (LPeak). Die Terzanalyse ergibt maximale Reduktionen von ca. 23 dB im relevanten pegelbestimmenden Frequenzbereich zwischen 100 und 800 Hz mit HSD-Elementen, die ausschließlich auf 120 Hz abgestimmt waren.

Überlegungen zur Schallausbreitung am Brodtener Pfahl

Rammvorgang mit üblicher Schallabstrahlung

Beim Rammvorgang mit Impulsrammen werden Dehnwellen in den Pfahl eingebracht, um den Pfahl stufenweise in den Boden zu treiben. Die durchlaufenden Dehnwellen führen bei Offshore-Pfählen nach Abbildung 14 zur direkten Abstrahlung von Hydroschallwellen in das Wasser sowie zu Erschütterungswellen in dem Boden.

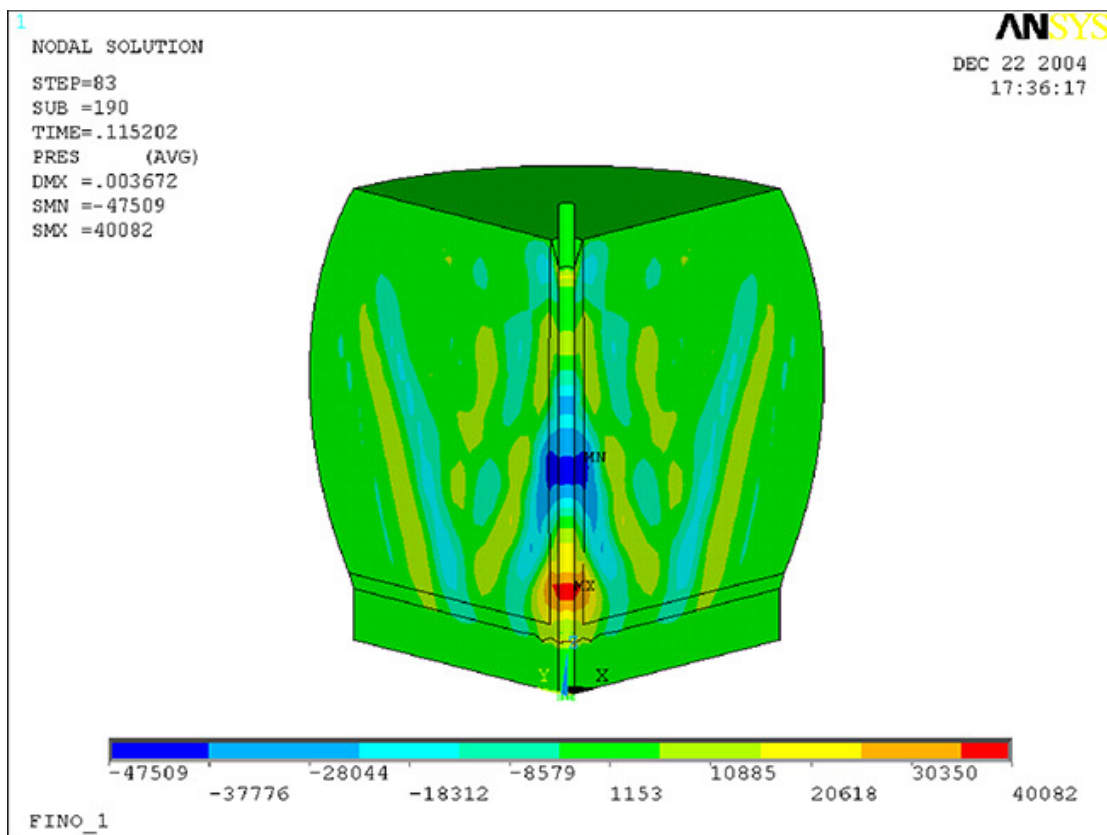


Abbildung 14: Ausbreitung einer Dehnwelle im Rammpfahl nach Elmer et al. (2007) mit der Abstrahlung und Ausbreitung des Hydroschalls im Wasser, und Reflexionen am Pfahlfuß und Teilreflexionen an Querschnittsprüngen

Akustisch stellen die Flachwasserbereiche (10 – 50 m) der Standorte von Offshore-Windenergie-Anlagen Wellenleiter dar, in denen die Hydroschallwellen nach Abbildung 14 sowohl am Meeresboden als auch an der Meeresoberfläche reflektiert und gedämpft werden und sich annähernd zylindrisch ausbreiten. Dabei verteilt sich die Schallenergie mit der Entfernung r , allein aus geometrischen Gründen, auf größer werdende Flächen, so dass die Energie pro Fläche zylindrisch mit $1/r$ abnimmt, zu-

züglich zu der Abnahme durch die o.g. Dämpfung.

Je nach Mantelreibung und bereits erfolgter Übertragung der Energie im Bereich des Pfahlfußes auf den Boden, kann die Dehnwelle im Pfahl, vor allem bei noch geringer Einbindetiefe des Pfahls, ein-oder mehrfach reflektiert werden. Dazu kommen noch Teilreflexionen der Dehnwelle bei abgestuften Pfählen, wie bei den Pfählen der FINO1 Jacket-Konstruktion, die der Simulation nach Abbildung 14 zugrunde liegen.

Insgesamt wird bei Offshore-Rammungen etwa 1% (bei größeren Wassertiefen bis 2%) der Rammenergie direkt in das Wasser abgestrahlt, während der überwiegende Teil der Rammenergie in den Meeresboden eingeleitet wird. Dabei ist die Energieübertragung durch Gleitreibungskräfte im Bereich des Pfahlmantels nach Abbildung 15a wesentlich geringer, als bei den hohen, erforderlichen Spitzendrücken im Bereich des Pfahlfußes.

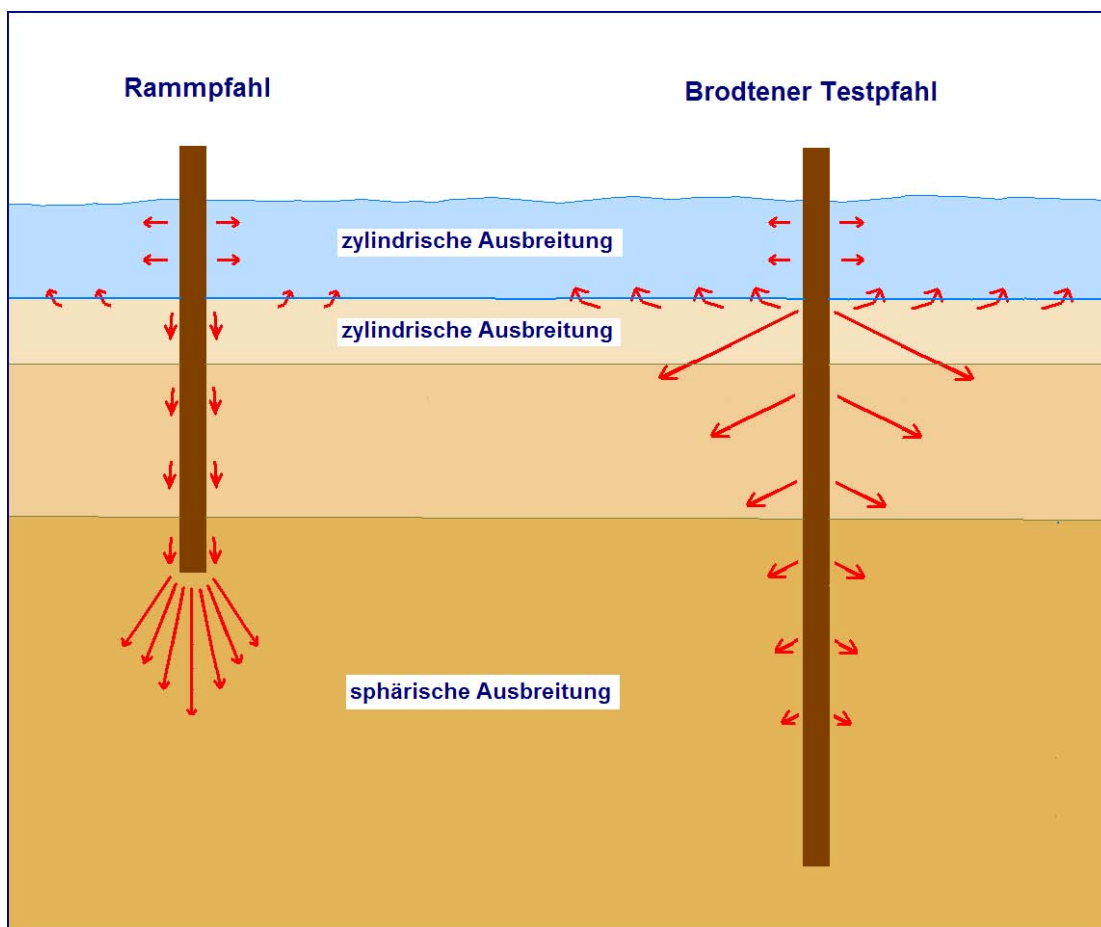


Abbildung 15: Ausbreitung Abstrahlung und Ausbreitung von Schall und Erschütterungen:
 a) bei einem üblichen Offshore-Ramppfahl (links),
 b) beim Brodtener Testpfahl (rechts).

Im Prinzip breitet sich die in den Boden eingeleitete Rammenergie sphärisch in Richtung der tieferen und steiferen Bodenschichten aus. Bei dieser räumlichen Ausbreitung nimmt die Energie pro Fläche sehr schnell mit $1 / r^2$ ab, zuzüglich zur Materialdämpfung im Boden.

Geschichtete Böden mit deutlichen Unterschieden in der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bzw. Impedanz der einzelnen Schichten wirken ebenfalls als Wellenleiter, die mit der Entfernung nur eine langsam abnehmende zylindrische Ausbreitung der Wellen ergeben. Die wassergesättigten Sedimentschichten des Meeresbodens stellen noch eine Sonderrolle dar, weil sie mit etwa 1.600 – 1.700 m/s leicht erhöhte Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten gegenüber dem Meereswasser von ca. 1.500 m/s aufweisen und damit die in den oberen Schichten enthaltene Schallenergie als indirekten Hydroschall in das Wasser übertragen können.

Rammvorgang beim Brodtener Testpfahl

Dieser Effekt spielt beim Brodtener Testpfahl nach Abbildung 15b eine entscheidende Rolle. Der Brodtener Testpfahl ist mit ca. 65 m ungewöhnlich tief in den Meeresboden eingebunden, und er ist darüber hinaus auch noch seit Jahren durch Inkrustation im kalk- und mergelhaltigen Boden vollständig mit dem Untergrund verwachsen. Während bei üblichen Rammpfählen nach Abbildung 15a der überwiegende Teil der Rammenergie über den Pfahlfuß tief in den Untergrund geleitet wird, bleibt beim Brodtener Testpfahl infolge der vollständigen Verzahnung des Pfahls mit dem Boden die gesamte Rammenergie in den oberen Schichten des Meeresbodens, wird dort abgestrahlt und führt zu einem wesentlichen Eintrag von indirektem Hydroschall in das Wasser.

Die Messung des IGB-TUBS am Pfahlkopf des Testpfahls zeigt nach Abbildung 16 für einen Rammschlag den Verlauf der eingeleiteten Kraft im Vergleich zu dem Produkt aus der gemessenen Geschwindigkeit und der Pfahlimpedanz. Der Kraftverlauf des Rammstoßes und die Antwort des Systems weisen auf einen rein transienten Wellenausbreitungsvorgang mit vollständiger Abstrahlung der Energie in den Boden, ohne nennenswerte Reflexionen vom Pfahlfuß. Vielmehr wird entsprechend dem weiteren Zeitverlauf nach Abbildung 16 der gesamte umgebende Boden zu tieffre-

quenten Schwingungen von etwa 12 Hz und 21 Hz angeregt. Diese Werte lassen sich aus einer entsprechenden Frequenzanalyse ablesen.

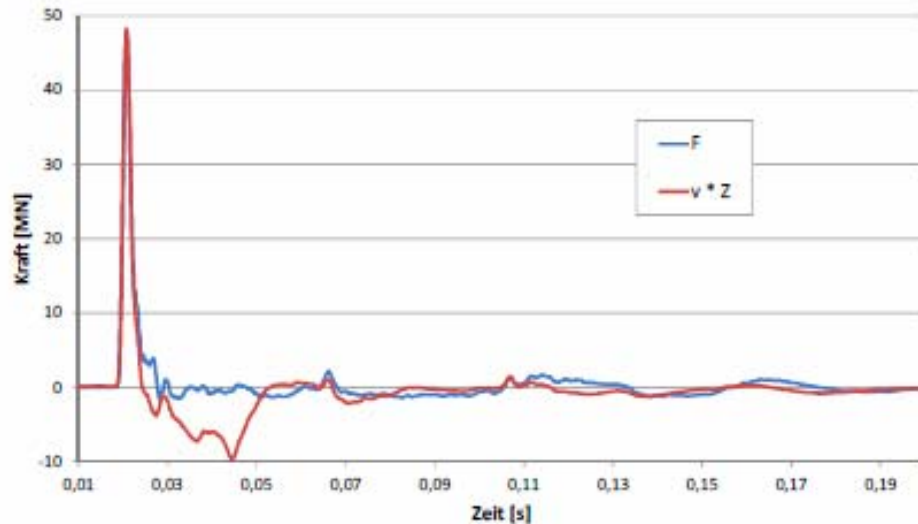


Abbildung 16: Gemessener Kraftverlauf und bezogene Geschwindigkeit eines Rammstoßes.

Unter Einbeziehung der anschließenden Sedimentschicht als untere Randbedingung der Eigenschwingungsformen kann die tiefste Eigenfrequenz der Wassersäule und damit untere Grenzfrequenz des Flachwasserbereiches mit etwa 80 Hz angenommen werden. Die tieffrequenten Bodenschwingungen breiten sich daher nicht über das Wasser, sondern über die oberen Bodenschichten aus. Sie können auch in größerer Entfernung einen wesentlichen indirekten Schalleintrag in das Wasser bewirken.

Offene, durchströmbare Schallminderungssysteme wie die Hydroschalldämpfer beeinflussen und bedämpfen den sie umgebenden Wasserkörper und erreichen damit auch wesentliche Schallminderungen im Bereich der Eigenfrequenz der Wassersäule bzw. unteren Grenzfrequenz von 80 Hz, wie den Messergebnissen zu entnehmen ist.

Für den Hydroschall beim Rammen von Offshore-Pfählen gibt es im Wesentlichen zwei Übertragungswege:

1. Die direkte Übertragung von Hydroschallwellen im Flachwasserbereich, der hier als Wellenleiter nur Schallwellen oberhalb der Grenzfrequenz von 80 Hz transportiert.
2. Die indirekte Übertragung und Einleitung von Hydroschall über den Meeresboden, die sehr stark von den lokalen Gegebenheiten und Bodenverhältnissen abhängt.

Beim Brodtener Testpfahl ist wegen der Inkrustation des Pfahles vor allem der indirekte Übertragungsweg nach Abbildung 15b von wesentlicher Bedeutung im Gegensatz zu der Situation bei üblichen Offshore-Rammvorgängen mit eindringenden Pfählen.

Schallminderungsverfahren am Rammpfahl beeinflussen im Wesentlichen den direkten Übertragungsweg des Hydroschalls im Wasser. Diese Schallminderungswirkung kann als systemeigene Schallminderung bezeichnet werden, die weitgehend unabhängig von den örtlichen Gegebenheiten auch auf andere Situationen übertragbar ist.

Der indirekte Übertragungsweg über den geschichteten Meeresboden ist weitgehend durch lokale Eigenschaften bestimmt, insbesondere beim Brodtener Testpfahl. Diese Einflüsse auf den Hydroschall sind daher nicht übertragbar.

Um die nicht übertragbaren, lokal bedingten Einflüsse bei der Untersuchung von Schallminderungsverfahren weitgehend auszuschließen, sind vom IGB-TUBS Hydroschallmessungen in unmittelbarer Nähe des Testpfahls, im akustischen Nahfeld, vorgenommen worden.

Akustische Nahfeldmessungen

Die Messungen in ca. 6 m Entfernung von der schallabstrahlenden Oberfläche des Pfahls sollen vor allem die gemessenen Schallminderungen als systemeigene, übertragbare Eigenschaften der unterschiedlichen Schallminderungsverfahren aufzeigen und lokale Einflüsse reduzieren.

In der Luftschallakustik sind Nahfeldmessungen im Abstand $r < 2\lambda$ von Schalldruck und Schallschnelle mit Hilfe von Schallintensitätssonden bei der Lokalisierung und Quantifizierung von Schallquellen seit mehr als 20 Jahren üblich (z.B. im Motorraum eines Pkw). Im Bereich des Hydroschalls gibt es diese Verfahren im Prinzip noch nicht.

Hintergrund der speziell erforderlichen Messverfahren im akustischen Nahfeld ist die Tatsache, dass in der Akustik nicht der skalare Schalldruck p [Pa] die eigentlich maßgebliche Größe darstellt, sondern die vektorielle Schallintensität I [W/m^2]. Die Schallenergie, die pro Zeiteinheit durch ein Flächenelement hindurch tritt, ist als Schallintensität I definiert und ergibt sich als Produkt aus den Effektivwerten von Schalldruck und Schallschnelle:

$$I = \vec{p} \cdot \vec{v} \quad \text{in } \text{W}/\text{m}^2$$

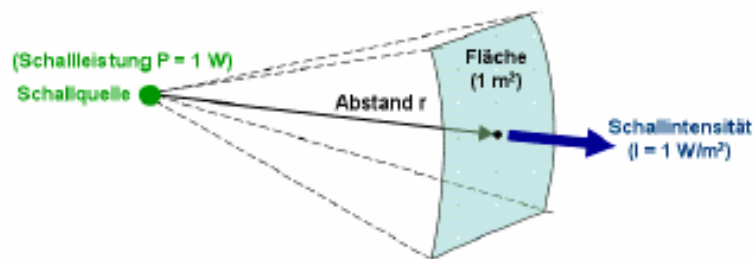


Abbildung 17: Schallintensität als sich ausbreitende Schallenergie pro Zeit und pro Fläche.

Die Schallintensität I ist eine ebenso richtungsabhängige vektorielle Größe, wie die Schallschnelle v mit ihren drei Richtungskomponenten v_x v_y v_z

Im Nahfeld (etwa im Abstand $r < 2\lambda$), dessen Eigenschaften sowohl von der Wellenlänge als auch von der Abstrahlungscharakteristik (kugelförmig oder zylindrisch) abhängt, nimmt die Schallschnelle mit der Entfernung deutlich stärker ab als im Fernfeld $r \gg \lambda$, so dass insbesondere bei tonhaltigem Schall mit zusätzlichen lokalen Schwingungen eine frequenzabhängige komplexe und komplizierte Beziehung zwischen der Schallschnelle und dem Schalldruck besteht.

Im Fernfeld gilt dagegen die einfache, frequenzunabhängige, konstante Beziehung:

$$\tilde{p} = \rho c \cdot \tilde{v} = Z \cdot \tilde{v}$$

mit der Dichte ρ und der Schallausbreitungsgeschwindigkeit c . Beim Hydroschall beträgt die Schallkennimpedanz Z :

$$Z = \rho c = 1,5 \cdot 10^6 \text{ in Ns/m}^3.$$

Mit den jeweiligen Bezugsgrößen für den Schalldruck, die Schallschnelle und die Schallintensität ergibt sich nun in der Akustik die sehr praktische Beziehung, dass im Fernfeld $r \gg \lambda$ (und nur im Fernfeld!) die jeweiligen Schallpegel für den Schalldruck, die Schallschnelle und die Schallintensität gleich sind!

Hydroschallmessungen des Schalldrucks werden üblicherweise nur im akustischen Fernfeld durchgeführt, so dass die ermittelten Schalldruckpegel gleichzeitig auch den maßgebenden Schallintensitätspegel darstellen. Bei den Nahfeldmessungen des Schalldrucks und den Ermittlungen der Schalldruckpegel im Rahmen der ESRa-Tests sind daher systematische Messfehler gegenüber den maßgebenden Schallintensitätspegeln zu erwarten.

Die Hydroschallabstrahlung des Rammvorganges beim Brodtener Testpfahl stellt nach den Abbildungen 14-16 einen transienten, rotationssymmetrischen Wellenausbreitungsvorgang dar, bei dem zwar die schallabstrahlende Fläche des Pfahls eine zylindrische Form aufweist, der aber weder durch zylindrische noch durch kugelförmige Abstrahlungscharakteristiken zu beschreiben ist, da keine Tonhaltigkeit vorliegt, die Schallquelle längs des Pfahls wandert und die Länge des vom Wasser benetzten Pfahls mit direkter Hydroschallabstrahlung nur ein Bruchteil der Dehnwellenlänge im

Pfahl beträgt.

Eine analytische Betrachtung der Hydroschallabstrahlung scheidet daher aus. Eine genauere numerische Analyse der transienten Hydroschallabstrahlung wird mit dem speziellen FDM-Programm „TransDyn“ (Elmer, 2004) durchgeführt, das für die dreidimensionale Simulation ausschließlich den Schalldruck und die 3 Geschwindigkeitskomponenten als phasenbehafte Feldgrößen zugrunde legt, die den transienten Wellenausbreitungsvorgang physikalisch vollständig und im Sinne der Schallintensitätsermittlung auch im Nahbereich realitätsnah beschreibt.

Das dreidimensionale numerische Modell umfasst die Wassertiefe von 8,5 m mit der Hydroschallausbreitung im Bereich der Kantenlänge des Modells von jeweils 12 m für einen Rammschlag nach Abbildung 16 von 4 ms Dauer, wobei die Schallerregung in den Simulationen der Abbildungen 17 und 18 sich aus der wandernden Dehnwelle im Rammpfahl ableitet. Das dreidimensionale Modell enthält ca. 10 Mio. Elemente von 5 cm Kantenlänge.

Die Ergebnisse der vergleichenden Ermittlung der Hydroschallpegel in 6 m Wassertiefe und unterschiedlicher Entfernung von der Schallquelle aus dem Schalldruck, der Schallschnelle und der berechneten maximalen Intensität sind in Abbildung 19 dargestellt. Der maximale Nahfeld-Fehler bei der Ermittlung des Schallintensitätspegels allein aus dem Schalldruck beträgt beim Testpfahl in 6 m Entfernung maximal 1 dB.

Aus diesem Grund kann für die folgenden Messergebnisse im Nahfeld ein systematischer Fehler von 1 dB angenommen werden.

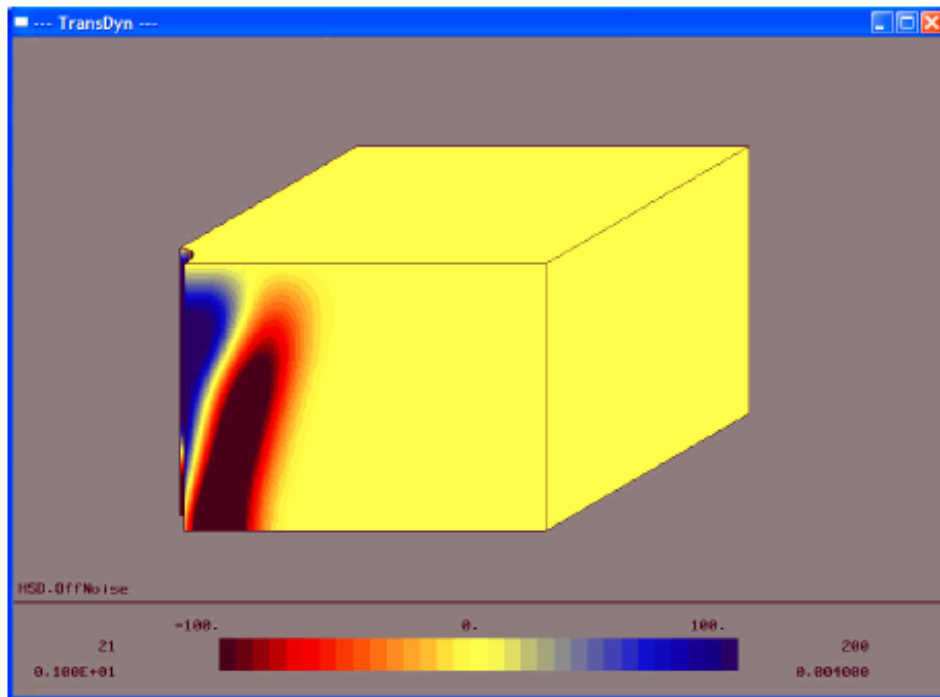


Abbildung 17: Hydroschalldruck-Verteilung im 3D-Modell nach 0,004 s in kPa.

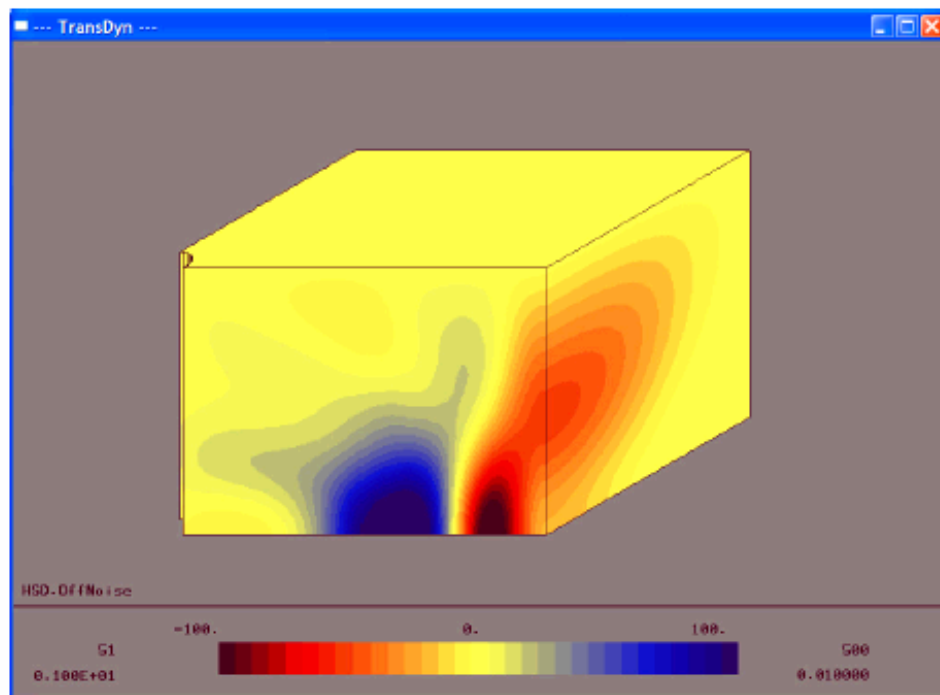


Abbildung 18: Hydroschalldruck-Verteilung im 3D-Modell nach 0,010 s in kPa.

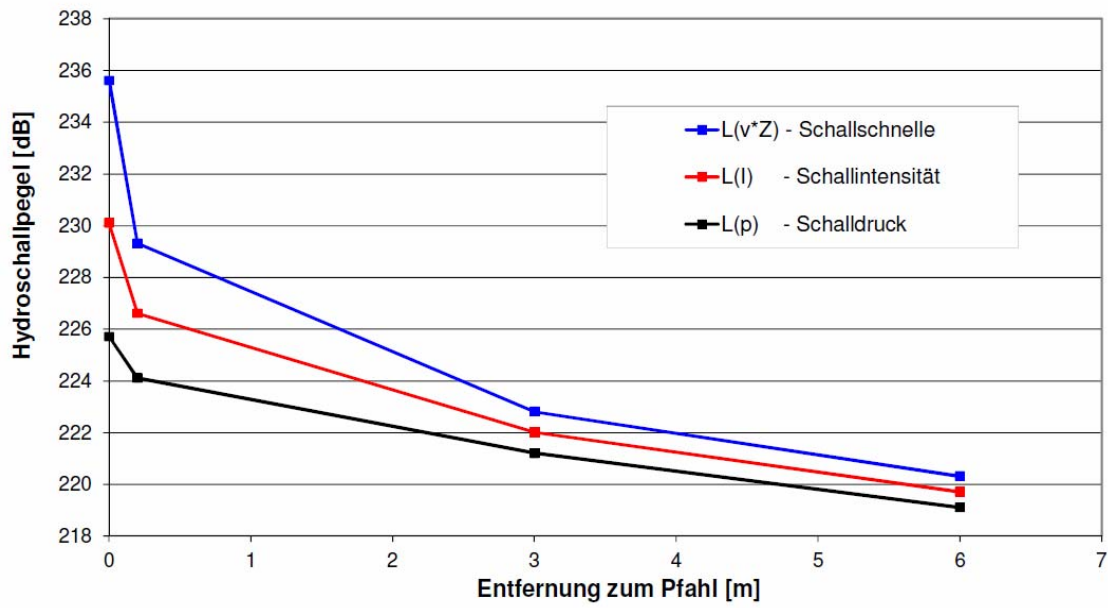


Abbildung 19: Vergleich der Hydroschallpegel-Verläufe im Nahfeld aus Druck, Schnelle und Schallintensität mit maximalem Fehler von 1 dB in 6 m Entfernung vom Pfahl.

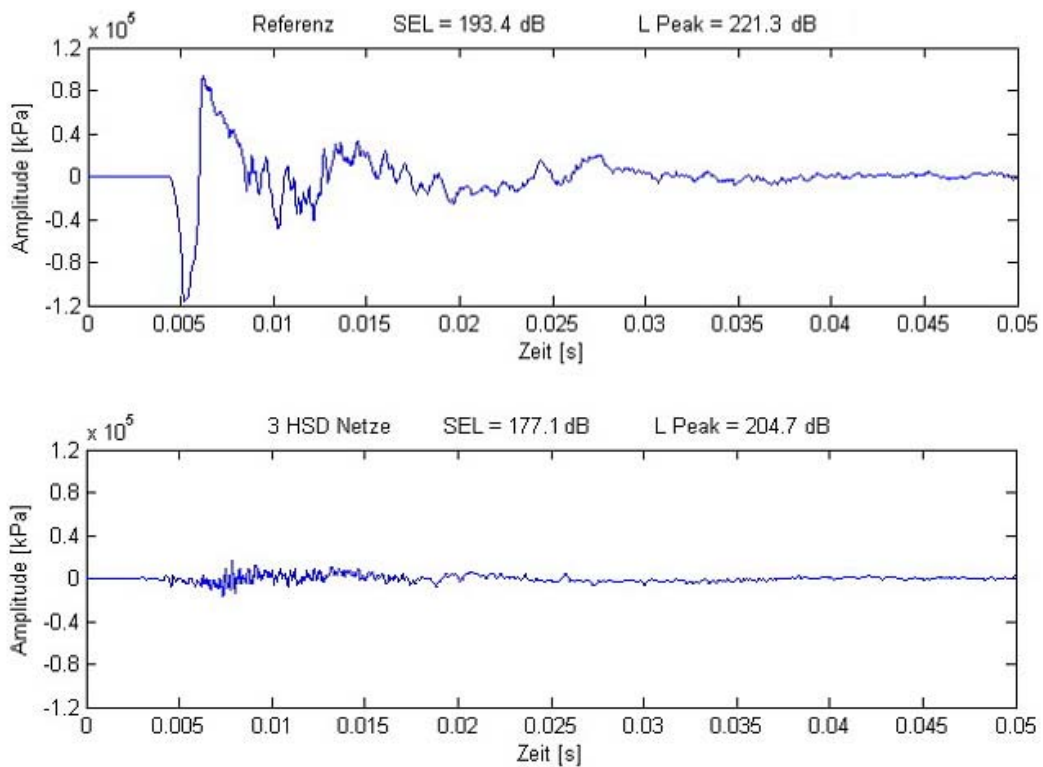


Abbildung 20: Reduktion des Hydroschalldrucks in 6 m durch Hydroschalldämpfer.

Als Antwort auf den Stoßvorgang nach Abbildung 16 ist in Abbildung 20 beispielsweise der in 6 m Entfernung gemessene Hydroschalldruck dargestellt. Hier treten noch keine Bodenreflexionen und lokal bedingten indirekten Einflüsse auf. Wie die Nahfeldmessungen zeigen, wird mit den Hydroschalldämpfern wird die direkte Schallenergie des Rammstoßes fast vollständig reduziert. Die Ergebnisse der Nahfeldmessungen können als systemeigene Schallminderungen auch auf andere Situationen übertragen werden.

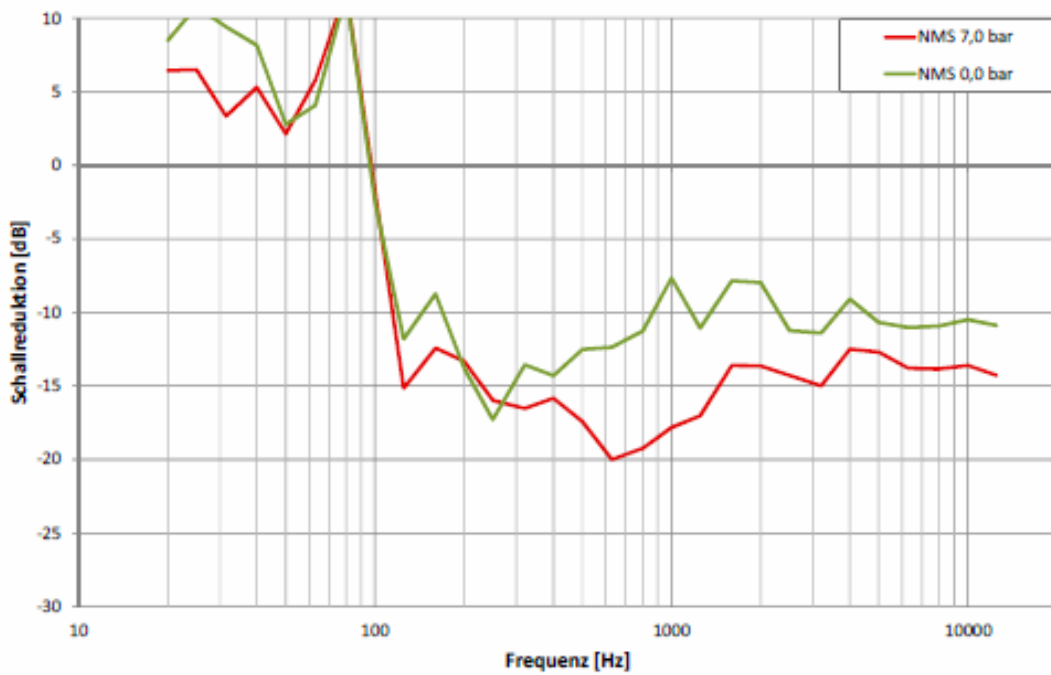
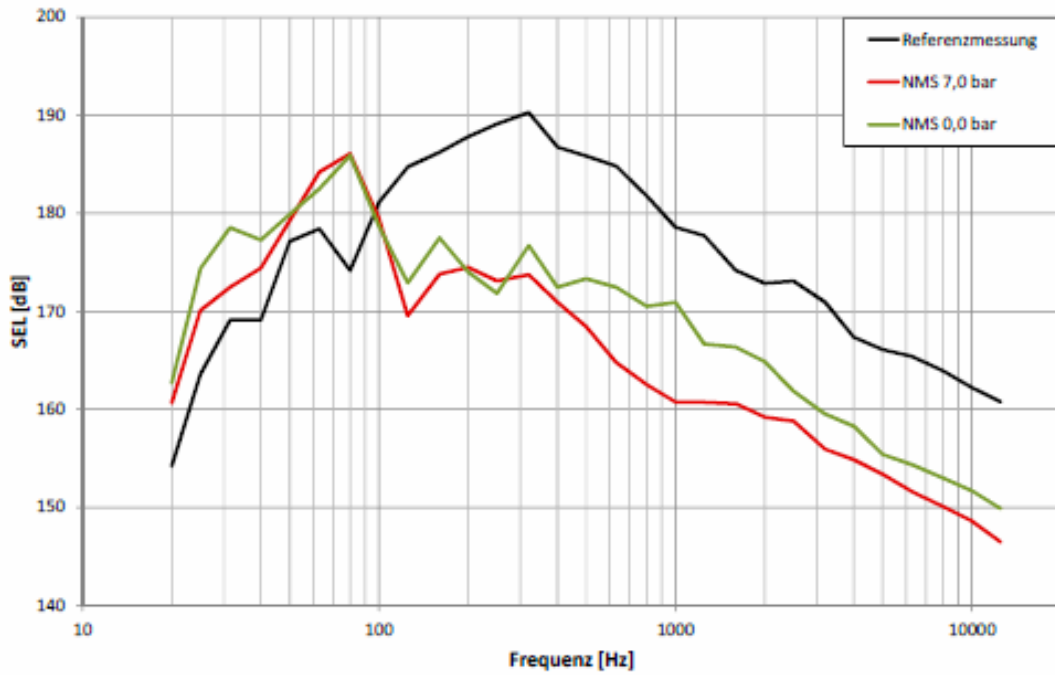
Literatur:

Elmer, K.-H.; Betke, K; Neumann, T. (2007): *Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch Schallimmission von OWEA, SCHALL 2*; BMU-Forschungsbericht 0329947, März, 2007.

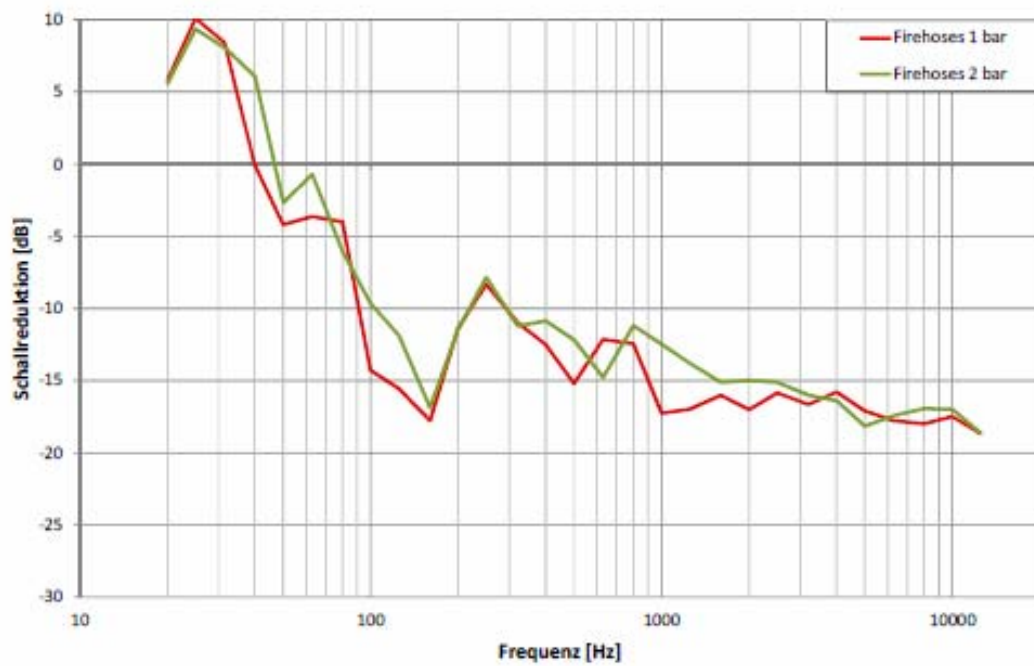
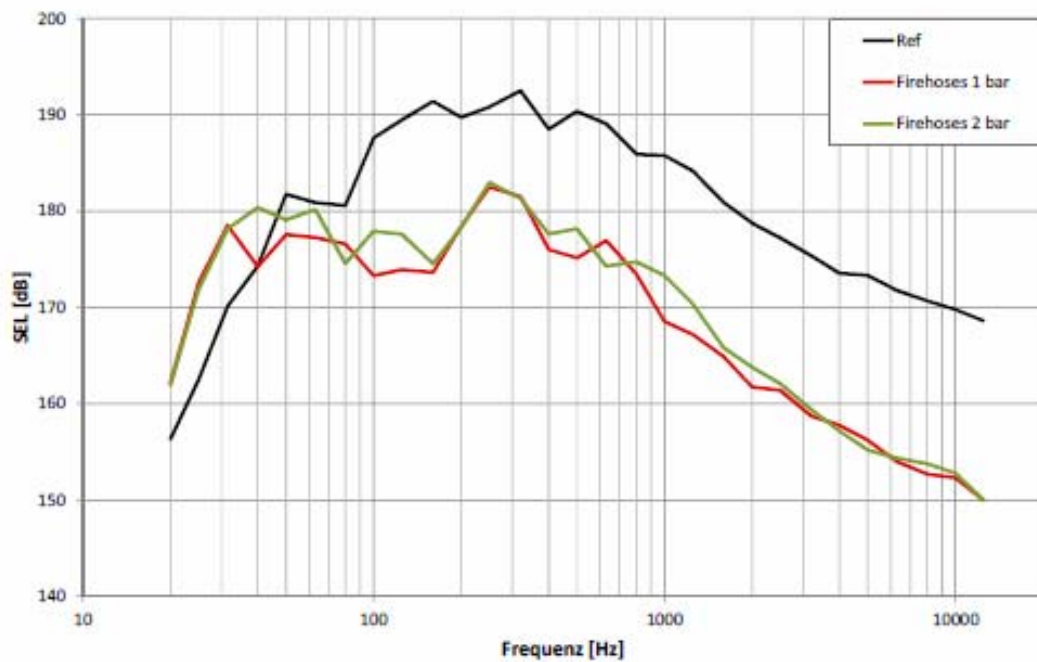
www.naturschutzstandards-erneuerbarer-energien.de/images/literatur/2007_Elmer_Schall_2_Offshore-Wind.pdf

Elmer, K.-H. (2004): *Three-Dimensional Wave Propagation and Energy Flow*; International Journal of Computational Engineering Science (IJCES), Imperial College Press, Vol.5, No.3, p. 481494, 2004.

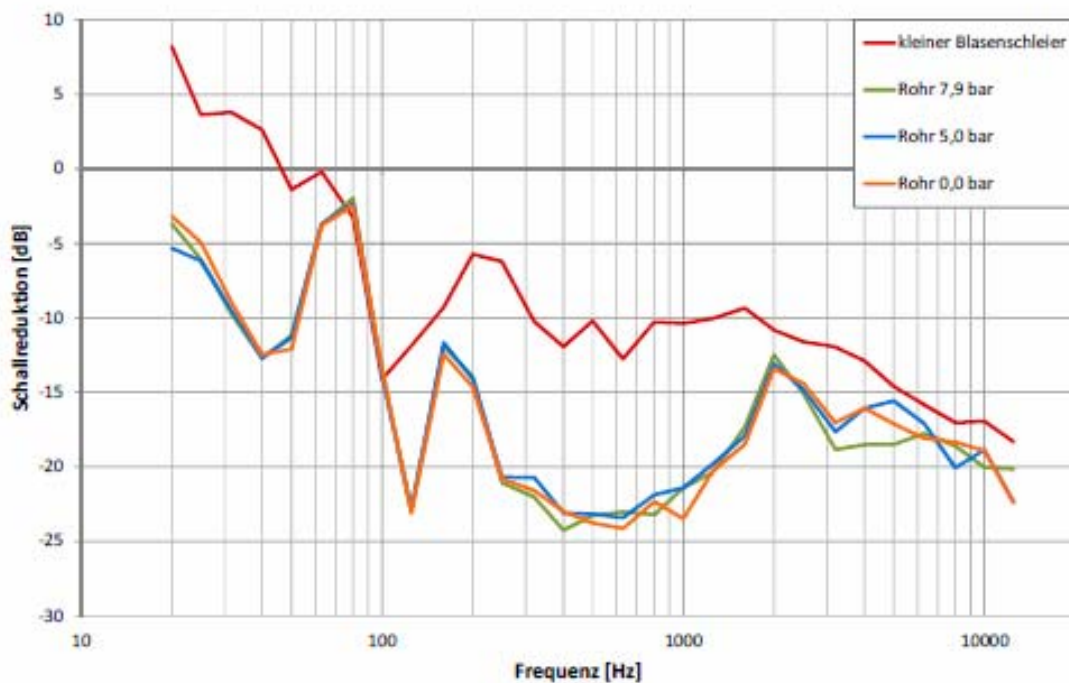
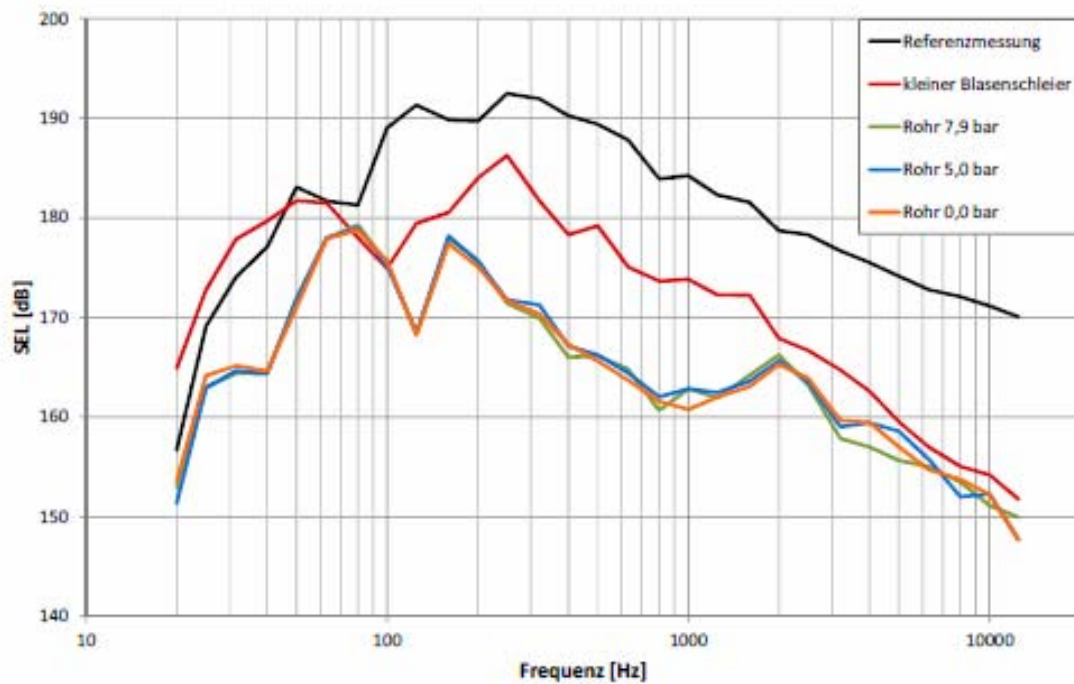
Anhang: Zusammenstellung der Terzanalysen von allen Testvariationen



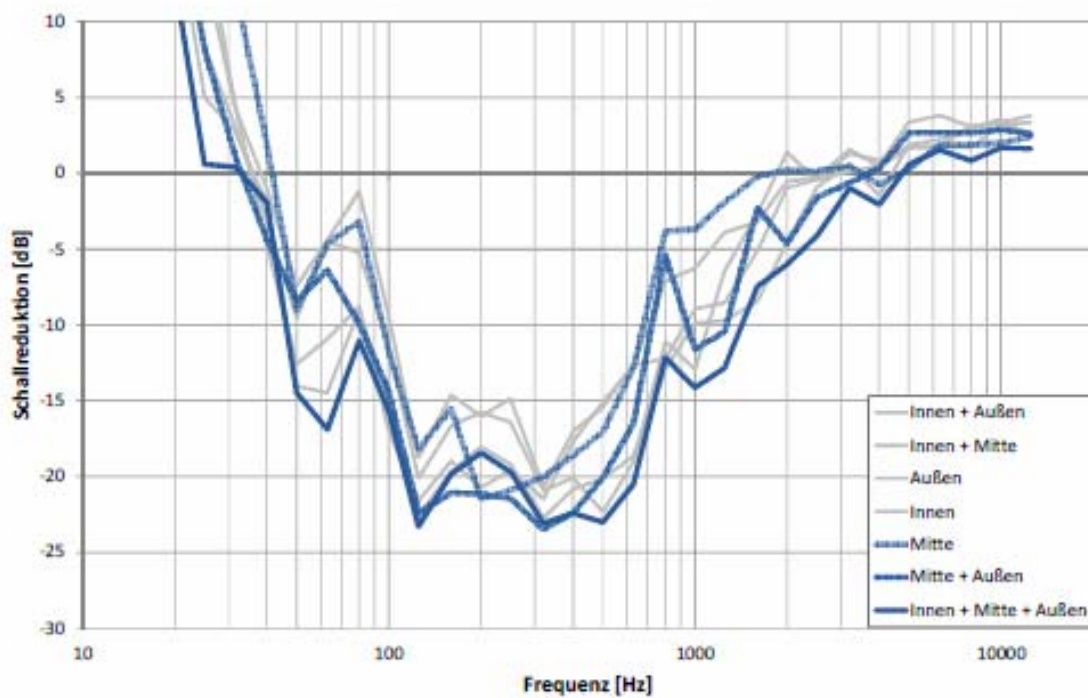
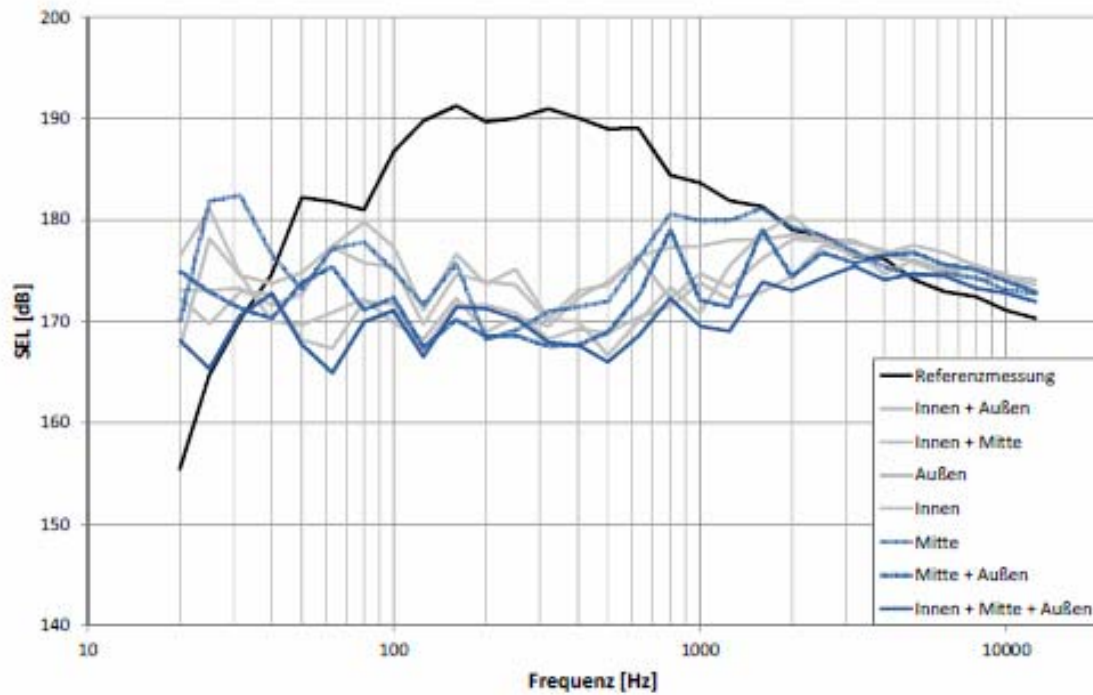
Terzanalysen bei Einsatz der IHC-Systeme und der Referenzmessung (oben) sowie die daraus resultierende Schallreduktion bei Einsatz der IHC-Systeme in Bezug auf die Referenzmessung (Messtag 1)



Terzanalysen bei Einsatz der Menck-Systeme und der Referenzmessung (oben)
sowie die daraus resultierende Schallreduktion bei Einsatz der Menck-Systeme
in Bezug auf die Referenzmessung (Messtag 2)



Terzanalysen bei Einsatz der Weyres-Systeme und der Referenzmessung (oben) sowie die daraus resultierende Schallreduktion bei Einsatz der Weyres-Systeme in Bezug auf die Referenzmessung (Messtag 3)



Terzanalysen bei Einsatz der HSD-Systeme und der Referenzmessung (oben)
sowie die daraus resultierende Schallreduktion bei Einsatz der HSD-Systeme
in Bezug auf die Referenzmessung (Messtag 4)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts ESRa – Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl, Technischer Abschlussbericht	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Wilke, Fabian; Kloske, Karin; Bellmann, Michael	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2011
	6. Veröffentlichungsdatum 04.05.2012
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RWE OLC GmbH Überseering 34 22297 Hamburg	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 0325307
	11a. Seitenzahl Bericht 182
	11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Postfach 12 06 29 53048 Bonn	12. Literaturangaben 28
	14. Tabellen 13
	15. Abbildungen 90
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Rahmen des ESRa-Forschungsprojektes sind am Brodtener Pfahl in der Lübecker Bucht (Ostsee) das Handling und die Wirkungsweisen von fünf unterschiedlichen Schallminderungssystemen für den Bau von geramnten Offshore-Windenergieanlagen in einem Ringversuch getestet worden: Rohr mit innen liegendem Blasenschleier der Fa. IHC, Feuerwehrschauchmethode der Fa. Menck, kleiner gestufter Blasenschleier der Fa. Weyres, Schalldämmschalen mit zwei Blasenschleiern (modular aufgebaut) der Fa. Weyres, Hydro Sound Damper der TU Braunschweig (TUBS)/Dr. Elmer. Die Systeme wurden unter identischen Umwelt-Randbedingungen eingesetzt: Ziel war es, die mit einem einheitlichen Messkonzept ermittelten Schallminderungspotentiale miteinander vergleichen zu können. Alle getesteten Schallminderungssysteme haben signifikante Minderungseffekte erbracht. In dem für den Grenzwert relevanten Radius von 750 Metern um die Schallquelle herum und in dem Bereich des größten Energieeintrags von 100 – 300 Hertz liegt die Dämpfung bei 0 bis 10 Dezibel (dB) SEL. In dem für die Meeressäuger besonders sensiblen Hörbereich von Frequenzen bis etwa 5.000 Hertz liegt der Minderungseffekt bei maximal 25 dB. Die breitbandige Reduktion des Einzelereignispegels (SEL) beläuft sich bei den Testsystemen auf 4,2 bis 6,1 dB. Korrigiert um den standortbedingten Bodeneinfluss wurden mit den Testsystemen Minderungen des breitbandigen SEL von etwa 7 – 9 dB erreicht.	
19. Schlagwörter Offshore-Windenergieanlagen, Hydroschall, Schallimmission, Hydroschallmessung, Hydroschallminderungsmaßnahmen, Hydroschallausbreitung	
20. Verlag	21. Preis

l) Hinweis für Bearbeiter/in:
Auf das Förderkennzeichen des BMU soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden

BMU-Vordr. 3831/10.02

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report	
3a. Report Title ESRa – Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Wilke, Fabian; Kloske, Karin; Bellmann, Michael		5. End of Project 31.12.2011
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date 04.05.2012
		7. Form of Publication
8. Performing Organization(s) (Name, Address)		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 0325307
		11a. No. of Pages Report 182
		11b. No. of Pages Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Postfach 12 06 29 53048 Bonn		12. No. of References 28
		14. No. of Tables 13
		15. No. of Figures 90
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract Within the ESRa-project five different noise mitigation systems have been evaluated in a round robin test. The five tested systems were: The noise mitigation screen from company IHC, the firehose system of company Menck, a little bubble curtain, a modular system consisting of two composite tubes with two internal bubble curtains by company Weyres and the Hydro Sound Damper of TU Braunschweig/Dr. Elmer. All systems were to be tested under equal boundary conditions and with the same measurement concept. Therefore, the already driven pile "Brodten Ost" in the Baltic Sea had been chosen as the test pile. All systems worked well, but the achieved reductions were highly frequency dependent: In the frequency range of 100 – 300 Hertz, where the highest energy is introduced in the water, the damping was between 0 and 10 Decibel (dB) SEL. In the for marine mammals most sensitive high frequency range up to 5'000 Hertz the reduction reached values of up to 25 dB. The broad-banded reduction of the SEL of the systems lies between 4.2 and 6.1 dB. Due to the specific boundary conditions at the test location it is evaluated that the results need to be corrected by 2-3 dB. Thus, the effective reductions were found to be between 7 and 9 dB.		
19. Keywords Offshore-Windenergy, Noise Mitigation System, Hydrosound, Soundemission, Hydrosoundmeasurement, Hydrosoundmitigation, Hydrosoundpropagation		
20. Publisher		21. Price