

Mitteilung des Instituts
für Geomechanik und Geotechnik
Technische Universität Braunschweig
Heft Nr. 117



Zur Schallausbreitung im System Pfahl-Wasser-Boden bei der Rammung von Offshore-Gründungspfählen

von
Benedikt Bruns

Braunschweig 2024

Herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Eingereicht am: 5. Januar 2024
Disputation am: 15. Mai 2024
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. Sascha Henke

Eigenverlag: Institut für Geomechanik und Geotechnik
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 51 b · 38106 Braunschweig
Telefon : (0531) 391-62000
Fax : (0531) 391-62040
E-Mail : igg@tu-bs.de
Internet : www.igg-tubs.de
ISBN : 978-3-948141-09-7

Druck: DruckVoll UG Anne Seckelmann
Weinbergweg 40 a · 38106 Braunschweig
Telefon : (0531) 390 679 64
Fax : (0531) 390 718 35
E-Mail : info@druckvoll-bs.de
Internet : www.druckvoll-bs.de

Druck auf chlorfrei gebleichtem Papier

Zur Schallausbreitung im System Pfahl-Wasser-Boden bei der Rammung von Offshore-Gründungspfählen

von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Benedikt Bruns
geboren am 20.02.1978
in Hildesheim

Eingereicht am:	5. Januar 2024
Disputation am:	15. Mai 2024
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann Prof. Dr.-Ing. habil. Sascha Henke

Braunschweig 2024

Die Erschütterung der Luft wird erst Schall, wo ein Ohr ist.

Georg Christoph Lichtenberg, (1742 – 1799)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Herausforderungen bei der Gründungsinstallation von OWEA hinsichtlich der Schallemission.....	3
2.1	Gründungsformen von Offshore-Windenergieanlagen.....	3
2.2	Problematik	6
2.3	Analyse akustischer Messungen	7
2.4	Aktueller Kenntnisstand	12
2.5	Vorschriften zum Schallschutz im internationalen Vergleich	17
3	Motivation und Zielsetzung	19
4	Grundlagen der Schallausbreitung.....	21
4.1	Schwingungen und Wellenausbreitung.....	22
4.2	Schalleintrag von der Luft ins Wasser.....	33
4.3	Pfahldynamik - Schalleintrag vom Pfahl ins Wasser	33
4.4	Bodendynamik - Schalleintrag vom Boden ins Wasser	35
4.5	Hydroakustik - Besonderheiten der Schallausbreitung im Wasser	36
4.6	Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung im Wasser.....	41
5	Auswirkung von Hydroschallemissionen auf marine Säuger	44
6	Schallminderungsverfahren	48
6.1	Blasenschleier	48
6.2	Hydro-Sound-Damper	54
7	Feldmessungen beim Offshore-Windpark 'Amrumbank West'	57
7.1	OWP 'Amrumbank West'	57
7.2	Schallminderungskonzept.....	59
7.3	Messkonzept	61
7.4	Messkampagnen	64
7.5	Messtechnische Instrumentierung	65
7.6	CTD-Sonden-Messung.....	71

8	Auswertung und Interpretation der Messungen.....	73
8.1	Datenaufbereitung und –auswertung	73
8.2	Rammprotokoll	75
8.3	Pfahldynamik.....	76
8.3.1	Energiebetrachtung	76
8.3.2	Pfahlbelastung im Zeitbereich	82
8.3.3	Schwingungsverhalten des Pfahles im Frequenzbereich.....	89
8.4	Hydroakustik.....	93
8.4.1	Kalibrierung der Hydrophone	93
8.4.2	Analyse im Zeit- und Frequenzbereich	95
8.4.3	Ermittlung von Pegelwerten	101
8.4.4	Empirischer Zusammenhang und Vergleichsberechnung.....	103
8.4.5	Auswirkung der Schallminderungssysteme auf die Schallausbreitung.....	107
8.5	Bodendynamik.....	114
8.5.1	Analyse im Zeit- und Frequenzbereich	115
8.5.2	Ermittlung von Pegelwerten	125
8.6	Interaktion der Systemkomponenten Pfahl, Wasser und Boden	126
8.6.1	Erhöhter Hydroschall Einzelereignispegel zu Beginn einer Rammung	126
8.6.2	Zusammenhänge zwischen Pfahlschwingung mit dem Hydroschall und der Bodendynamik.....	129
8.6.3	Einfluss der Bodenwelle auf den Hydroschall.....	132
9	Schlussfolgerungen.....	136
10	Zusammenfassung und Ausblick	138
11	Literaturverzeichnis	142
Anhang.....		149
Anhang A	Entwicklung Schallpegel über Rammung.....	149
Anhang B	SEL über die Tiefe	157
Anhang C	Terzanalysen.....	161
Anhang D	Rammprotokolle	165

1 Einleitung

Bereits seit mehreren Jahrzehnten beobachten Wissenschaftler weltweit die steigenden mittleren Durchschnittstemperaturen und den damit einhergehenden Klimawandel auf der Erde. Klimaforscher erwarten bis zum Jahr 2100 einen weiteren Anstieg zwischen 1,8°C und 4,0°C. Verantwortlich für den Temperaturanstieg sind vor allem die weltweit seit Beginn der Industrialisierung steigenden CO₂-Emissionen, insbesondere durch die Verbrennung fossiler Energieträger, die den natürlichen Treibhauseffekt in seinem Gleichgewicht stören und die Temperatur auf der Erde steigen lassen.

Um diesem drohenden Klimawandel und seinen Folgen entgegen zu wirken, strebt die EU mit dem EU-Klimapakete eine gemeinsame Klima- und Energiepolitik in Europa an. Ziel ist es, die CO₂-Emissionen schrittweise bis zum Jahr 2050 um 80 % gegenüber dem Stand von 1990 zu senken. Erreicht werden soll dies unter anderem durch einen stetig wachsenden Anteil der regenerativen Energien an der Stromerzeugung. Ein Schwerpunkt zur Erlangung dieses klimapolitischen Zieles ist der Ausbau der Offshore-Windenergie. Bis zum Jahr 2030 soll die Leistung der Windenergieanlagen in der deutschen Nord- und Ostsee auf 25 GW ausgebaut werden.

Um die Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) auf See zu errichten, werden derzeit in den meisten Fällen die Pfähle mit Hilfe von Hydraulikkrammen in den Boden eingetrieben. Bei diesem Vorgang entstehen lärmintensive Schallemissionen, die über den gerammten Pfahl in den Meeresboden sowie in das Meerwasser übertragen werden und sich dort konzentrisch über weite Entfernungen in den beiden Medien ausbreiten. Insbesondere die im Meerwasser entstehenden Schalldrücke wirken sich negativ auf marine Säugetiere, Fische und andere im Meer lebende Organismen aus.

Zum Schutz dieser Lebewesen hat das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) als Genehmigungsbehörde für Offshore-Windparks eine Empfehlung für Grenzwerte des Hydroschalls veröffentlicht, nach welcher der energetische Einzelereignispegel (Sound Exposure Level, SEL) einen Wert von 160 dB re 1 µPa²s und der Spitzenpegel (L_{Peak}) einen Wert von 190 dB re 1 µPa in einer Entfernung von 750 m zur Rammlokalisation nicht überschreiten darf (Umweltbundesamt, 2011). Diese Werte sind als Grenzwerte für die Rammung von Offshore-Gründungen in die Genehmigungsverfahren aufgenommen (Diederichs et al., 2014) und werden während jeder Gründungsinstallation messtechnisch überwacht. Die dabei zu beachtenden Regularien sind in der Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen (Müller et al., 2011) sowie im Standard Untersuchungskonzept (StUK4) (BSH, 2013) beschrieben.

Bei den sich derzeit im Bau befindlichen Offshore Windparks (OWP) werden zur Einhaltung der Grenzwerte des Hydroschalls Schallminderungsverfahren eingesetzt. Dabei wurden neben dem Großen Blasenschleier (big bubble curtain, BBC), der in großem Radius (80 – 100 m) um den Pfahl und das Errichtungsschiff ausgelegt wird, der Noise Mitigation Screen der Fa. IHC Merwede (IHC-NMS) und der Hydro Sound Damper (HSD) zur seriellen Einsetzbarkeit entwickelt. Diese beiden Systeme werden unmittelbar am Pfahl (Distanz zum Pfahl nur wenige Meter) eingesetzt. Da bei aktuellen Projekten Monopiles mit einem Durchmesser von über 8 m installiert werden sollen (Hoffmann et al., 2022), welche bei einer ungeminderten, freien Schallausbreitung Schallpegel von über 180 dB (SEL) (Bellmann et al., 2020) erzeugen, sind Schallminderungen von über 20 dB (SEL) erforderlich, um den Grenzwert verlässlich einzuhalten. Die Erfahrungen zeigen, dass dafür ein System dafür alleine nicht mehr ausreichend ist, weshalb der kombinierte Einsatz von Schallminderungsmaßnahmen bei der Genehmigung und dem Bau von Offshore-Windparks eine immer größere Bedeutung bekommt (Bellmann et al., 2014). Bei den Gründungsarbeiten für den OWP *Amrumbank West* kam erstmals die Kombination der Schallminderungsverfahren HSD und Großer Blasenschleier zum Einsatz. Zur Untersuchung der Schallabstrahlung und Wellenausbreitungscharakteristik bei Einsatz ohne, mit und der Kombination beider Schallminderungssysteme in den unterschiedlichen Medien Pfahl, Wasser und Boden wurden im Forschungsprojekt triad (FKZ: 0325681) vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig (IGB-TUBS) in Kooperation mit der *E.ON Kraftwerke GmbH* als Bauherr installationsbegleitend umfangreiche Messkampagnen durchgeführt.

2 Herausforderungen bei der Gründungsinstallation von OWEA hinsichtlich der Schallemission

2.1 Gründungsformen von Offshore-Windenergieanlagen

Für den Bau von Offshore-Windenergieanlagen wird auf bewährte Methoden aus der Offshore-Erdöl- und Offshore-Erdgasindustrie zurückgegriffen, die weiterentwickelt und auf die Wirtschaftlichkeit von OWEA übertragen wurden und weiterhin werden. So geschieht das Fixieren der Windräder am Meeresboden auf unterschiedliche Weise.

Die Faktoren für die Wahl der Gründungsvariante sind hierbei vor allem die Wassertiefe, der anstehende Baugrund, sowie Art und Größe der auftretenden Lasten. Die Lasten entstehen durch das Eigengewicht der Anlage, aber vor allem durch Wind, Wellen, Strömung und eine zyklische Belastung durch das Rotieren der Rotorblätter. Auch die Ingenieurphilosophie, Stahlpreise und der Anlagentyp können bei der Wahl der geeigneten Gründungsvariante eine Rolle spielen.

In Bild 1 sind verschiedene Gründungsvarianten zusammengefasst, die zum Teil bereits in Nord- und Ostsee zum Einsatz kamen. Diese lassen sich in schallarme und schallintensive Installationsmethoden unterteilen.

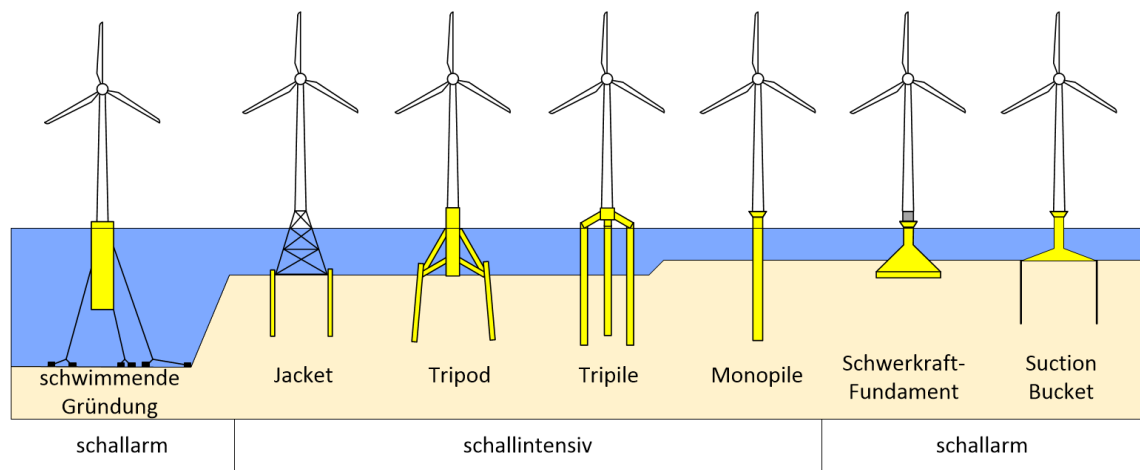


Bild 1: Schallintensive und schallarme Installationsmethoden für Offshore-Gründungsstrukturen

Während schwimmende Gründungen, das Schwerkraftfundament sowie das Suction Bucket (Saugrohr-Gründung) auf schallarme Weise im Meeresboden verankert werden, ist für die Gründungsformen Monopile, Tripod, Tripile und Jacket eine schallintensive Installation mit Impulsschlagrammen derzeit unumgänglich. Alternativ ist die weniger

schallintensive Vibrationsrammung möglich, der jedoch aktuell die Schlagrammung nachgeschaltet werden muss, um die erforderlichen Tragfähigkeiten zu erzeugen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der schallintensiven Installationsmethode des Impulsrammverfahrens von Monopilegründungen und den daraus resultierenden Schallemissionen, da sie derzeit durch ein effizientes und vergleichsweise kostengünstiges Design den Stand der Technik repräsentieren und die am häufigsten installierte Gründungsstruktur darstellen (Bild 2). Das Verfahren ist erprobt und kann in den meisten Böden angewandt werden, die in der Nord- und Ostsee vorkommen. Die in Bild 2 genannten Spar, Semi-sub und Barge-Fundamente gehören zu den schwimmenden Gründungsstrukturen.

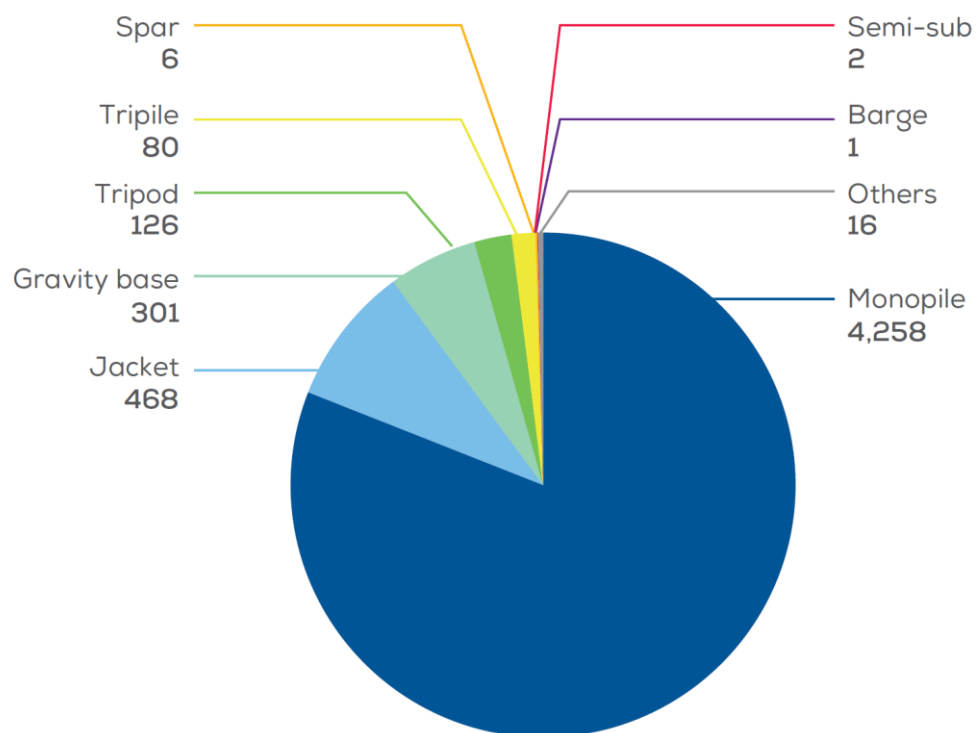


Bild 2: bis 2019 insgesamt installierte Gründungen für OWEA in Europa (WindEurope, 2019)

Die zeitliche Entwicklung des Monopiledesigns zeigt Bild 3. Geschuldet der größer werdenden Wassertiefe, Turbinenleistung und -gewichte sind die Pfahldurchmesser und -gewichte von bis zu 4 m und 1.000 t bei Wassertiefen bis 25 m bis 2012 mittlerweile auf 8 m und 1.600 t bei Wassertiefen von 40 m gestiegen. Derzeit in der Planung befindliche Monopiles werden in Wassertiefen bis 50 m mit Pfahldurchmessern von über 10 m und mehr als 2.000 t Gewicht gegründet (Hoffmann et al., 2022).

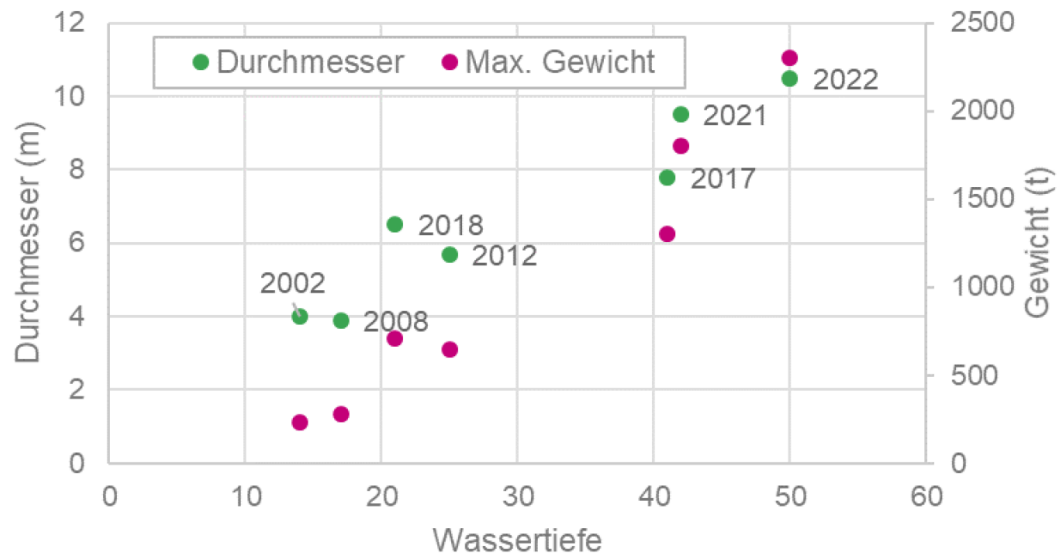


Bild 3: Entwicklung des Pfahldurchmessers und –gewichts mit der Wassertiefe unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung (Dührkop et al., 2019)

2.2 Problematik

Sowohl bei der Impulsrammung als auch der Vibrationsrammung sind große dynamische Kräfte für den Vortrieb der Pfähle notwendig. Die dabei in den Pfahl induzierte Energie breitet sich über die Übertragungswege Pfahl-Wasser, Pfahl-Boden und Boden-Wasser im Wasser- und Bodenkörper aus. Sie stellt ein großes Gefährdungspotential für die maritimen Meeresbewohner insbesondere den Schweinswal dar. Eine Prinzipskizze der Schallausbreitung ist folgendem Bild 4 zu entnehmen.

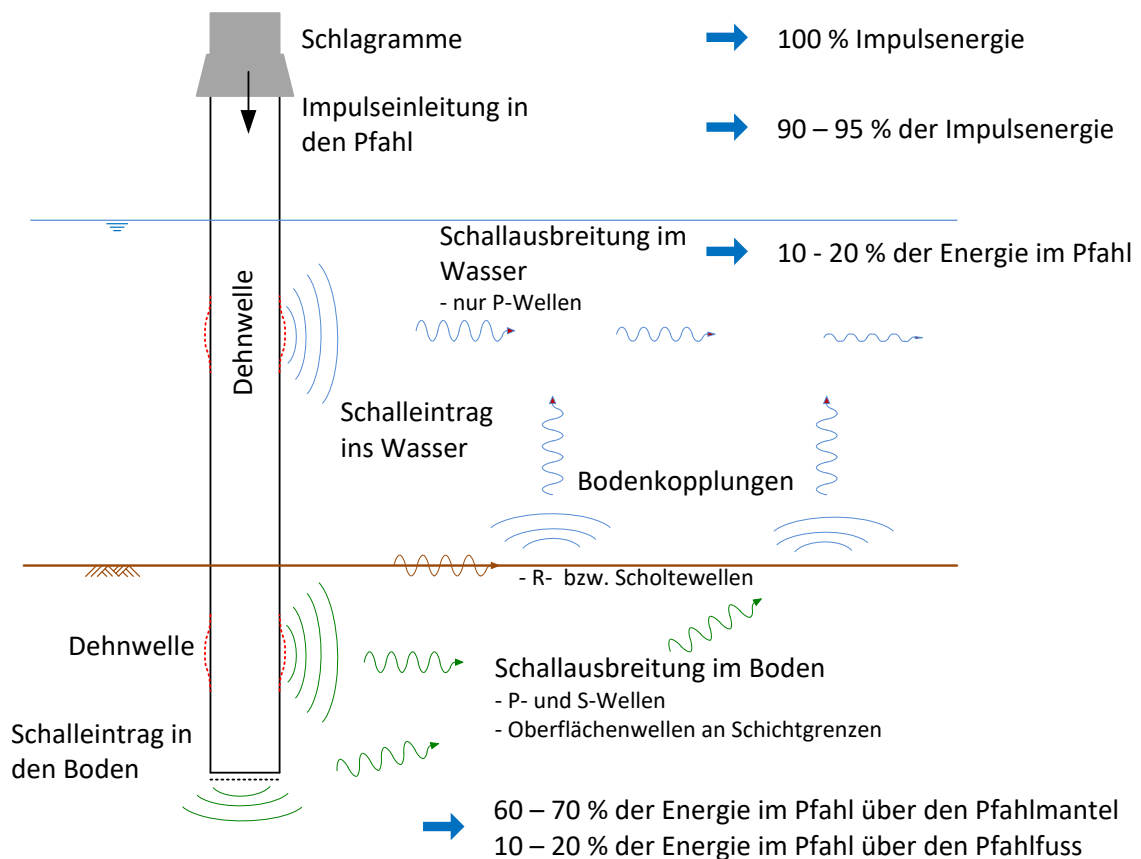


Bild 4: Wellenausbreitungsvorgänge im System Pfahl-Boden-Wasser

Nach (Siegl, 2017) werden 90 % bis 95 % der vom Hydraulikhammer erzeugten Energie in den Pfahl übertragen. Von der in den Pfahl eingeleiteten Energie wiederum werden 10 % bis 20 % über den direkten Übertragungsweg in das Meerwasser abgestrahlt. 60 % bis 70 % der Energie werden über den Pfahlmantel in den Boden emittiert und die restlichen 10 % bis 20 % über die Pfahlspitze.

Die sich im Wasser ausbreitende Druckwelle wird als Hydroschall bezeichnet und bewirkt einen hohen, impulsartigen relativen Druckanstieg um 10 bar bis 30 bar. Dieser kann extrem schädlich für die Hörorgane der Schweinswale aber auch die Luftblasen

von Fischen sein (Koschinski et al., 2013). Zum Schutz der Tiere hat das Umweltbundesamt (UBA) einen zulässigen Grenzwert von 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ für einen Rammimpuls bzw. Einzelereignis als Summenpegel (SEL) und 190 dB re 1 μPa als Spitzenpegel (L_{peak}) in einer Entfernung von 750 m ($\text{SEL}_{750\text{ m}}$) zur Installationslokation festgelegt (Umweltbundesamt, 2011). Deutschland ist mit der Herausgabe der Messvorschrift und den darin enthaltenen Schallschutzvorgaben richtungsweisend. Ein internationaler Vergleich findet sich in Kapitel 2.5.

Bei sich aktuell im Bau befindlichen Windparks werden Pfähle mit einem Durchmesser von über 8 m in den Meeresboden eingerammt. Dabei werden Hydroschallpegel von über 180 dB $\text{SEL}_{750\text{ m}}$ gemessen (Bellmann et al., 2020). Es besteht daher ein großer Bedarf an Schallminderungssystemen, die verlässlich über 20 dB $\text{SEL}_{750\text{ m}}$ Schallminderung bewirken, um den Grenzwert einhalten zu können. Zur Auslegung dieser Systeme besteht ein besonderes Interesse am Verständnis der Wellenausbreitung im Wasser und Meeresboden. Insbesondere die frequenzabhängige Wellenausbreitung im Wasser sowie der Einfluss des Meeresbodens hinsichtlich Erschütterungsamplitude und Wirkungsradius infolge der Pfahlrammung sind von großer Bedeutung und derzeit wenig erforscht.

2.3 Analyse akustischer Messungen

Akustische Messungen haben zum Ziel, die Schallausbreitung in einem Medium zu erfassen. Zur Beschreibung der Lautstärke von Schall werden i.d.R. Pegelgrößen verwendet. Hierbei handelt es sich um logarithmierte Werte der Dezibel (dB)-Skala, welche auf einen Referenzdruck p_0 bei Luft- (Veit, 2005) und Wasser- bzw. Hydroschall (Veit, 1979) bzw. eine Referenzpartikelgeschwindigkeit v_0 für Bodenschall (Studer et al., 2007) bezogen werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Referenzwerte für unterschiedliche Ausbreitungsmedien

Ausbreitungsmedium	Referenzwert	Einheit
Luft	$p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$	[Pa]
Wasser	$p_0 = 1 \cdot 10^{-6}$	[Pa]
Boden	$v_0 = 1 \cdot 10^{-6}$	[mm/s]

Wahrgenommen wird der Schall in Luft und Wasser durch Druckunterschiede, da sich das in Schwingung versetzte Medium unterschiedlich verdichtet oder ausdünnert und somit ein erhöhter oder verringerter Druck entsteht, der Schalldruck p (Coolen et al., 2011).

Der Schalldruck ist dem Druck des umgebenden Mediums, in der Luft dem Luftdruck und im Wasser folglich dem hydrostatischen Druck, additiv überlagert (Veit, 1979) und wird in der Einheit Pascal [Pa] ermittelt und angegeben. Im Boden erfolgt dies durch die Partikelgeschwindigkeit v in der Einheit mm/s (Studer et al., 2007). Der Lärmpegel zu einem beliebigen Zeitpunkt t in einem Medium ist definiert zu

$$L(p, t) = 20 \log \left(\frac{p(t)}{p_0} \right) \quad \text{bzw.} \quad L(v, t) = 20 \log \left(\frac{v(t)}{v_0} \right). \quad (2.1)$$

Aufgrund unterschiedlicher Referenzdrücke und verschiedenen akustischer Impedanzen ist ein direkter Vergleich von Pegelwerten in unterschiedlichen Medien nicht möglich. Beispielsweise ist ein Pegelwert im Wasser im Vergleich zu einem Pegel in der Luft etwa 62 dB lauter (von Estorff et al., 2013). Der Einfachheit halber ist in den folgenden Gleichungen auf die analoge Schreibweise für die Partikelgeschwindigkeit v verzichtet.

Die Bewertung von Schallereignissen ist grundsätzlich in der (DIN 1320:1997-06) und (DIN 45630:1971-12) geregelt. Hinsichtlich der Beurteilung des Hydroschalls ist die Auswertemethodik aus aktuellem Anlass der Offshore Windenergie in der Messvorschrift für Unterwasserschall nach (Müller et al., 2011) sowie (Müller et al., 2013) ausführlich erläutert, die vom BSH herausgegeben wurden. Hierbei sind der Spitzenpegel L_{Peak} sowie der Einzelereignispegel L_E bzw. SEL (Sound Exposure Level) von entscheidender Bedeutung. Die analytische Ermittlung dieser Größen wird an folgendem exemplarischen Schalldruckverlauf eines Rammschlages veranschaulicht (Bild 5).

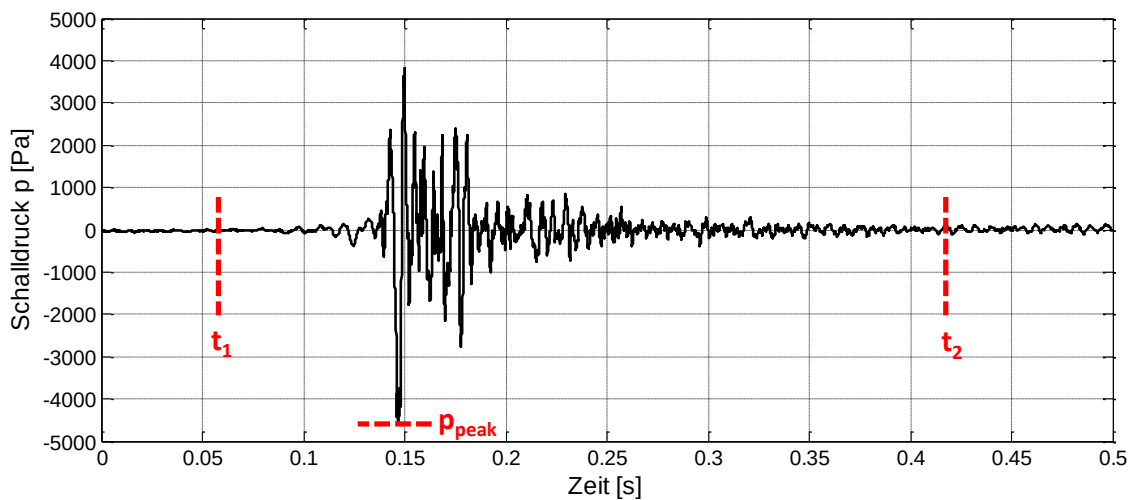


Bild 5: exemplarischer Verlauf des Schalldruckes über die Zeit eines Rammschlages bei einem Monopile ohne Schallminderung gemessen in 750 m Entfernung

Der Spitzenpegel wird durch die Überführung des maximalen absoluten Druckes p_{Peak} eines Intervalls in die Dezibel-Skala ermittelt nach

$$L_{\text{peak}} = 20 \log \left(\frac{|p_{\text{peak}}|}{p_0} \right). \quad (2.2)$$

Er gibt folglich ausschließlich Informationen über den maximalen Ausschlag eines Signals. Für Offshore-Rammungen ist darüber hinaus der Energiegehalt eines Rammschlages von Interesse. Die Analyse erfolgt über die Dauer des Ereignisses mit Hilfe des Einzelereignispegels. Dabei wird der Schalldruck über einen gewählten Zeitraum integriert und auf die Mittelungszeit T_0 von 1 s bezogen:

$$SEL = L_E = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right). \quad (2.3)$$

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

Die Grenzen des Schallereignisses zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 sind für die Berechnung des SEL so zu wählen, dass zum einen das gesamte Signal erfasst wird und keine Signalanteile verloren gehen und zum anderen möglichst wenig Störgeräusche vor oder nach dem eigentlichen Schallereignis das Ergebnis verfälschen. Bei Offshorerammungen spielt der Hintergrundlärm i.d.R. eine zu vernachlässigende Rolle. Nach (Elmer et al., 2007) beträgt dieser je nach Art der Anregung bis zu 120 dB. Wird hingegen ein zu kurzer Teil des Ereignisses ausgeschnitten, wird der SEL unterschätzt bzw. zu gering ermittelt. Der Einzelereignispegel eines Rammschlages ist stets geringer als der zugehörige Spitzenpegel.

Der Vollständigkeit halber sei noch auf den Mittelungspegel oder energieäquivalenten Dauerschallpegel L_{eq} nach Formel hingewiesen.

$$L_{\text{eq}} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2.4)$$

Bei impulsartigen Schallereignissen wie z.B. Rammschlägen hängt der L_{eq} stark von der Signallänge T ab, welche nach der Messvorschrift des BSH auf 30 s festgelegt ist (Müller et al., 2011). Bei Rammarbeiten in deutschen Offshore-Windparks (OWP) wird im Allgemeinen der SEL als Maß für den Energiegehalt der Schallereignisse verwendet. Im

Übrigen gibt es keine Empfehlung für einen Grenzwert des L_{eq} (Umweltbundesamt, 2011). L_{eq} und SEL können über die Beziehung

$$SEL = L_{eq} - 10 \log \left(\frac{nT_0}{T} \right) \quad (2.5)$$

in Bezug gesetzt werden, wobei n die Anzahl der Einzelereignisse ist. Damit entspricht der Einzelereignispegel SEL eines Impulses dem äquivalenten Dauerschallpegel L_{eq} eines kontinuierlichen Signals von 1 s Dauer mit der gleichen Energie wie der Impuls. Bis hierher findet noch keine Frequenzgewichtung der Signalverläufe statt. Diese ist jedoch insbesondere für die Übertragung der Pegel auf das Hörvermögen verschiedener Spezies von Bedeutung. Umgesetzt wird dies über die Transformation der Signale vom Zeit- in den Frequenzbereich. In Bild 6 (oben) ist das Ergebnis einer Fast Fourier Transformation (FFT) des Schallsignals aus Bild 5 dargestellt, welches den Schalldruck über den Frequenzbereich zeigt.

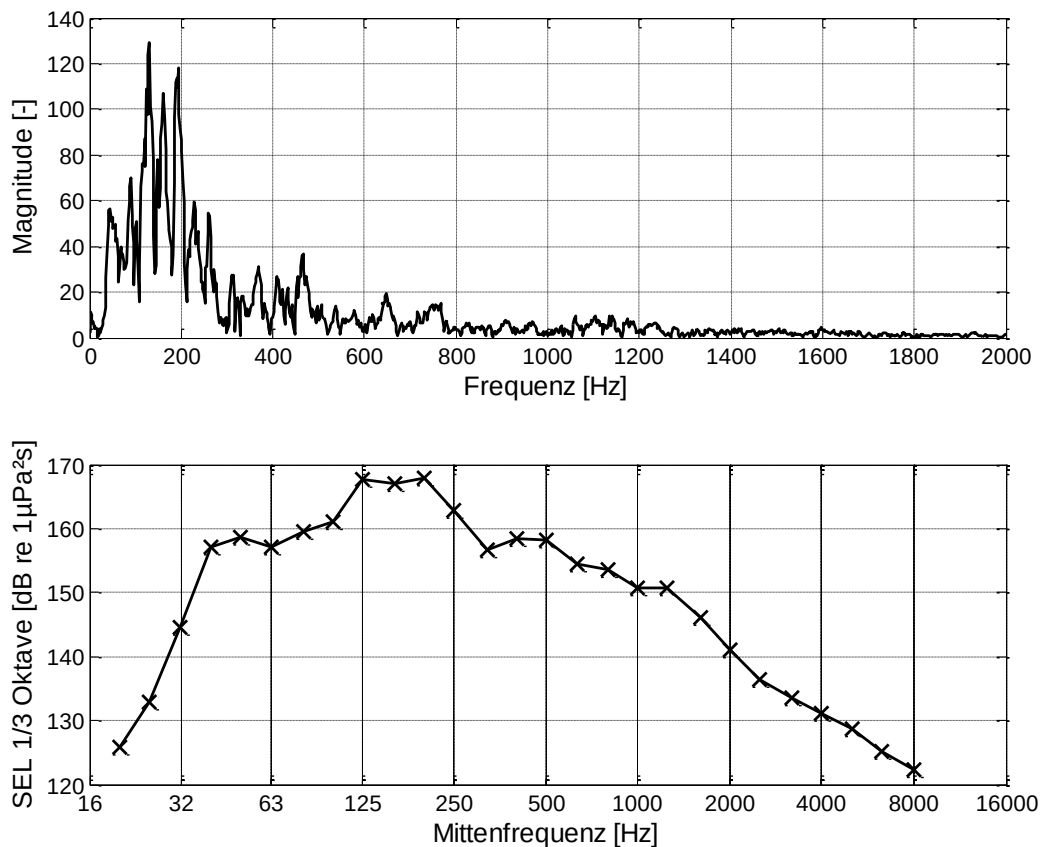


Bild 6: Ergebnis einer FFT (oben) und Terzanalyse (unten) des Rammschlages aus Bild 5

Üblicherweise wird in der Akustik die Auflösung über den Frequenzbereich der Übersicht halber weniger genau in Terzen zusammengefasst. Dies geschieht durch die Anwendung verschiedener Bandpassfilter auf das zu untersuchende Schallsignal.

Ein mittels Bandpass gefiltertes Signal enthält nur denjenigen Teil eines Signals, der im Bereich eines bestimmten Frequenzbandes liegt. In Bild 7 ist das der jeweilige Bereich bei 0 dB. Die übrigen Frequenzanteile des Signals werden stark gedämpft und damit unterdrückt. Nach Anwendung der einzelnen Bandpassfilter (unterschiedliche Kurven in Bild 7) auf das zu untersuchende Signal erfolgt für jede Terz eine Berechnung des Einzelschallereignispegels (SEL) nach Gleichung (2.3. Das Ergebnis einer Terzanalyse gibt analog zur FFT Rückschluss über den Frequenzgehalt eines Signals, jedoch in geringerer Auflösung über den Frequenzbereich. Dargestellt in Terzanalysen wird der Lärmpegel SEL über die Frequenz (Bild 6 unten).

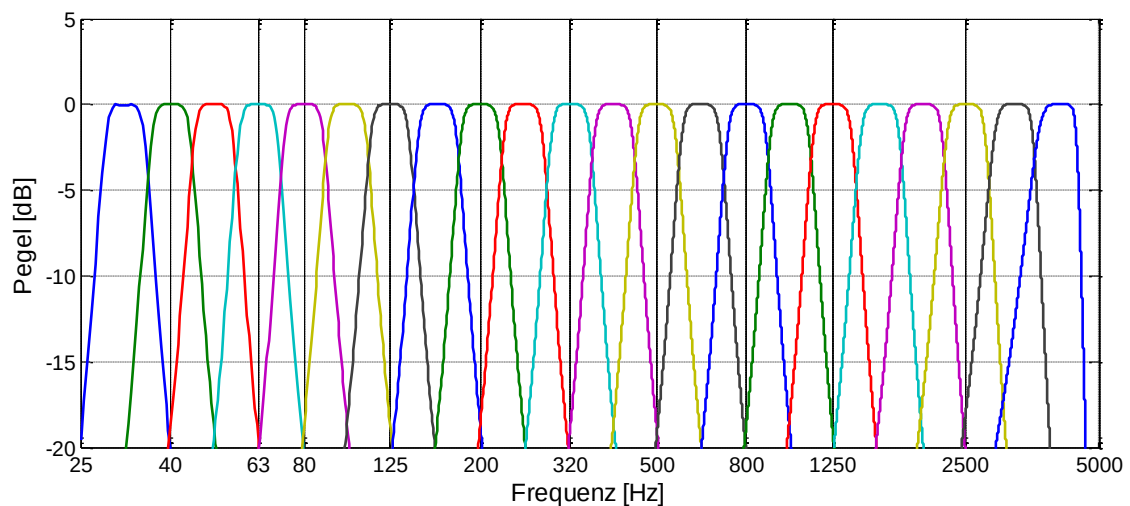


Bild 7: Filterantworten einzelner Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 31,5 Hz bis 4.000 Hz

2.4 Aktueller Kenntnisstand

Zu den Grundlagen der Wellenausbreitung separat betrachtet in Pfahl, Wasser und Boden existiert eine Vielzahl an nationaler und internationaler Literatur, die sich u.a. in den aufgeführten Grundsätzen zur Auswertung akustischer Messungen in den bereits beschriebenen und noch folgenden Kapiteln widerspiegeln.

Der Forschungszweig zur Untersuchung der Hydroschallausbreitung und Interaktion der Wellenausbreitung im System Pfahl-Wasser-Boden infolge Offshore-Rammarbeiten hingegen ist vergleichsweise jung und resultiert aus dem 2011 beschlossenen deutschen Atomausstieg und dem damit verbundenen Einstieg in den Ausbau der regenerativen Energien. In der Literatur sind in (Wilke et al., 2012) erste Messergebnisse zu finden, die die Interaktion der Wellenausbreitung in Wasser und Boden ansatzweise beschreiben. Erstmals wurden im Zuge des ESRa-Tests 2011 (**E**valuation von **S**ystemen zur **R**amm-schallminderung an einem Offshore-Testpfahl) in 13 m Entfernung zu einem Testpfahl an einer Position Erschütterungsmessungen auf der Meeresbodenoberfläche durchgeführt. Veröffentlicht dazu ist die Bild 8 zu entnehmende Darstellung eines Erschütterungsverlaufes als Zeitsignal eines Ramm-schlages mit und ohne Schallminderungssystem (NMS = Noise Mitigation System), aufgezeichnet mit einem Geophon auf der Meeresbodenoberfläche.

Der hochfrequente Rammimpuls (vgl. Bild 5) ist eindeutig im Erschütterungssignal zu erkennen, jedoch zeigt sich, dass das Erschütterungssignal im Vergleich zum Hydroschall deutlich länger andauert. Im Signalverlauf zeigt sich sowohl vor als auch nach dem Rammimpuls eine tieffrequente 12 Hz-Sinusschwingung. Diese wird vom Autor als Eigenmode des Pfahles interpretiert. Der Bereich vor dem Rammimpuls resultiert demnach aus einer Aktivität des Rammhammers und der Bereich dahinter aus der am Pfahlfuss reflektierten, den Pfahl wieder hinauflaufenden Dehnwelle.

Die generelle Zielsetzung des ESRa-Testes bestand in der Wirksamkeitsuntersuchung verschiedener pfahlnaher Schallminderungssysteme unter identischen Randbedingungen. Das Ergebnis der Untersuchungen war mit einer durchschnittlichen Schallminderung von 6 dB SEL_{@750 m} verhältnismäßig ernüchternd, da einige Systeme bereits im Vorfeld höhere Schallminderungswerte bewirkt hatten. Des Weiteren ergaben Hydroschallmessungen in 6 m Entfernung deutlich höhere Schallminderungswerte.

Als Ursache für die vergleichsweise geringen Schallminderungswerte in 750 m Entfernung wurde damals der Einfluss des Bodens auf den Hydroschallpegel bzw. die sogenannte Bodenkopplung oder Untertunnelung an diesem „speziellen“ Standort angegeben. Dieser wurde deshalb als „speziell“ bezeichnet, da der Pfahl Jahrzehnte lang als

Testpfahl eines Hammerherstellers fungierte. Der Pfahl wurde zu Testzwecken mehrfach verlängert und besitzt folglich eine unverhältnismäßig lange Einbindung von über 65 m und lange Standzeit. Der Pfahl hat im Zuge des ESRa-Tests im Gegensatz zu einer Offshore-Rammung keine axiale Verschiebung erfahren und somit hat sich eine nicht übertragbare Wellenausbreitung im System im Vergleich zu einer einmaligen Installation einer Gründungspfahles für eine OWEA ergeben. Der Einfluss des Bodens resultierend aus den Randbedingungen wurde mit 2 bis 3 dB $SEL_{750\text{ m}}$ abgeschätzt (Wilke et al., 2012).

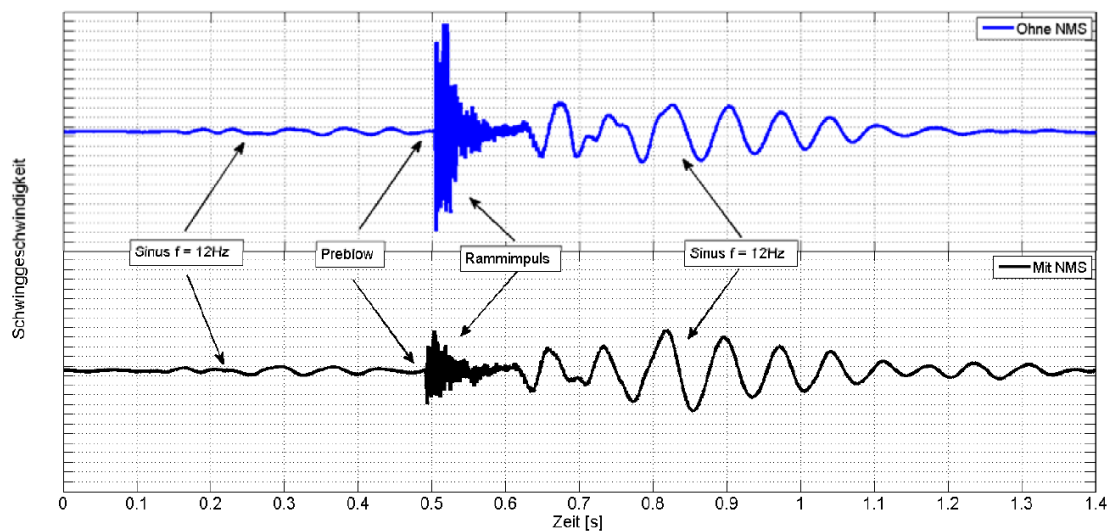


Bild 8: Zeitfunktion (Zeitsignale) eines Geophons (Erschütterung) eines Rammimpulses in 13 m Abstand vom Testpfahl am Sediment bei einer verwendeten Rammenergie von 300 kJ (Wilke et al., 2012)

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wurden von Bruns (2013) veröffentlicht. Die Messungen wurden im Gegensatz zum ESRa-Test nicht an einem Testpfahl ohne axiale Verschiebung, sondern während der regulären Installation eines Monopiles für eine OWEA beim Windpark *London Array* mit wachsender Einbindung durchgeführt. Hintergrund der Untersuchungen war der erstmalige Einsatz des Schallminderungssystems HSD unter realen Offshore Bedingungen. Bild 9 zeigt auszugsweise die zeitsynchron aufgenommenen Ergebnisse zweier Rammimpulse. Zur besseren Korrelation sind hier die Messdaten eines Hydrophons im Wasser (1 m über dem Meeresboden) mit einem korrespondierenden Geophon an der Meeresbodenoberfläche in gleicher Entfernung zum Rammpfahl sowie zwei weiterer Geophone in größerem Abstand dargestellt. Dies ermöglicht den direkten zeitlichen Bezug der Wellen im Wasser und an der

Meeresbodenoberfläche. Die Geophonsignale zeigen den vertikalen Erschütterungsverlauf in [mm/s] an der jeweiligen Position.

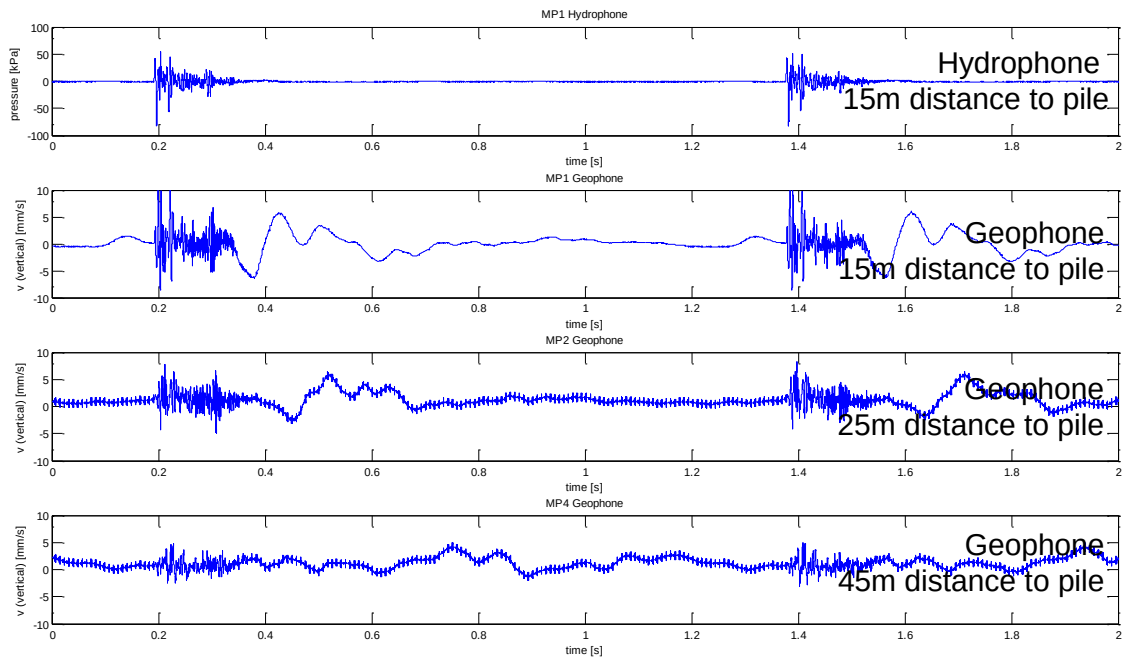


Bild 9: Zeitfunktionen zweier Rammimpulse von einem Hydrophon und drei Geophone mit unterschiedlichem Abstand zum Pfahl (Bruns, 2013)

Analog zum ESRa-Test ist auch hier der Rammimpuls sehr gut sowohl im Wasser als auch an der Meeresbodenoberfläche zu erkennen. Die tieffrequenten Schwingungen vor dem Rammimpuls sind ebenfalls jedoch ausschließlich beim Geophonsignal in 15 m Entfernung erkennbar. Nach dem Rammimpuls hingegen sind sie mit einer höheren Amplitude bei allen drei Messpositionen deutlich erkennbar und haben vergleichbar mit dem ESRa-Test ebenfalls eine Frequenz von etwa 10 Hz bis 12 Hz. Nach Bruns (2013) sind diese tieffrequenten Schwingungen jedoch nicht auf die den Pfahl hoch und runter laufende Dehnwelle zurückzuführen, da diese Welle auch Energie ins Wasser abstrahlen müsste und somit ebenfalls im Hydroschall erkennbar wäre. Im Hydrophonsignal werden zu diesem Zeitpunkt jedoch keine Druckschwankungen erfasst. Vielmehr geht der Autor davon aus, dass die Schwingung vor dem Rammimpuls auf Aktivitäten des Rammhammers zurückzuführen ist.

Der niederfrequente Anteil nach dem Rammimpuls hingegen ist auf die energiereiche Oberflächenwelle mit einer geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit als die Hydroschallwelle zurückzuführen. Dieser Signalanteil ist deutlich in wachsender Entfernung mit abnehmender Amplitude zu erkennen. Gleichzeitig erhöht sich die Dauer zwischen dem Rammimpuls und der niederfrequenten Schwingung. Aufgrund der zeitlichen Differenz

von Hydroschall und Bodenschwingung geht der Autor in diesem Fall von einer geringen Bodenankopplung aus, da zum Zeitpunkt der tieffrequenten Schwingung im Geophon-signal an gleicher Messposition keine Druckschwankungen beim Hydrophon zu verzeichnen sind. Durch von der *itap GmbH* ausgeführte Hydroschallmessungen zur Beurteilung der Schallminderungswirkung wurde ein ähnlicher Effekt wie beim ESRa-Test nachgewiesen. Im Nahbereich wurde eine Schallreduktion von bis zu 17 dB (SEL) bestimmt, in 750 m und 1.500 m Entfernung lag diese geringer bei 9 – 10 dB (SEL).

Weitere Untersuchungen zu diesem Thema wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens BORA (FKZ 0325421A/B/C) durchgeführt und von (Siegl, 2017) im Rahmen einer Dissertation analysiert. Zielstellung dieser Arbeit war die Untersuchung der Übertragungswege der Schallausbreitung im System Hammer-Pfahl-Wasser bei drei Offshore-Messkampagnen mit drei unterschiedlichen Gründungsstrukturen (Tripile, Tripod und Monopile) und die daran anschließende Entwicklung eines numerischen Schallquellmodells. Darüber hinaus wurden ebenfalls Messungen auf dem Meeresboden mit einem Geophon (Lobster (Lob)) und einem Hydrophon (SLS) durchgeführt.

Ein Ergebnis dieser Messungen bei einer Monopileinstallation ist in Bild 10 gezeigt. Dargestellt ist die Bodenvibration infolge eines Rammschlages an drei unterschiedlichen Positionen. Die schwarze Kurve zeigt jeweils die Bodenvibration und die rote den Hydroschalldruck. Auch hier sind die beiden zeitlich voneinander getrennt auftretenden hoch- (gekennzeichnet durch die grau schraffierte Fläche der K- und P-Welle) und tieffrequenten (gekennzeichnet durch die grau schraffierte Fläche der Scholtewelle) Wellenanteile zu erkennen, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausbreiten.

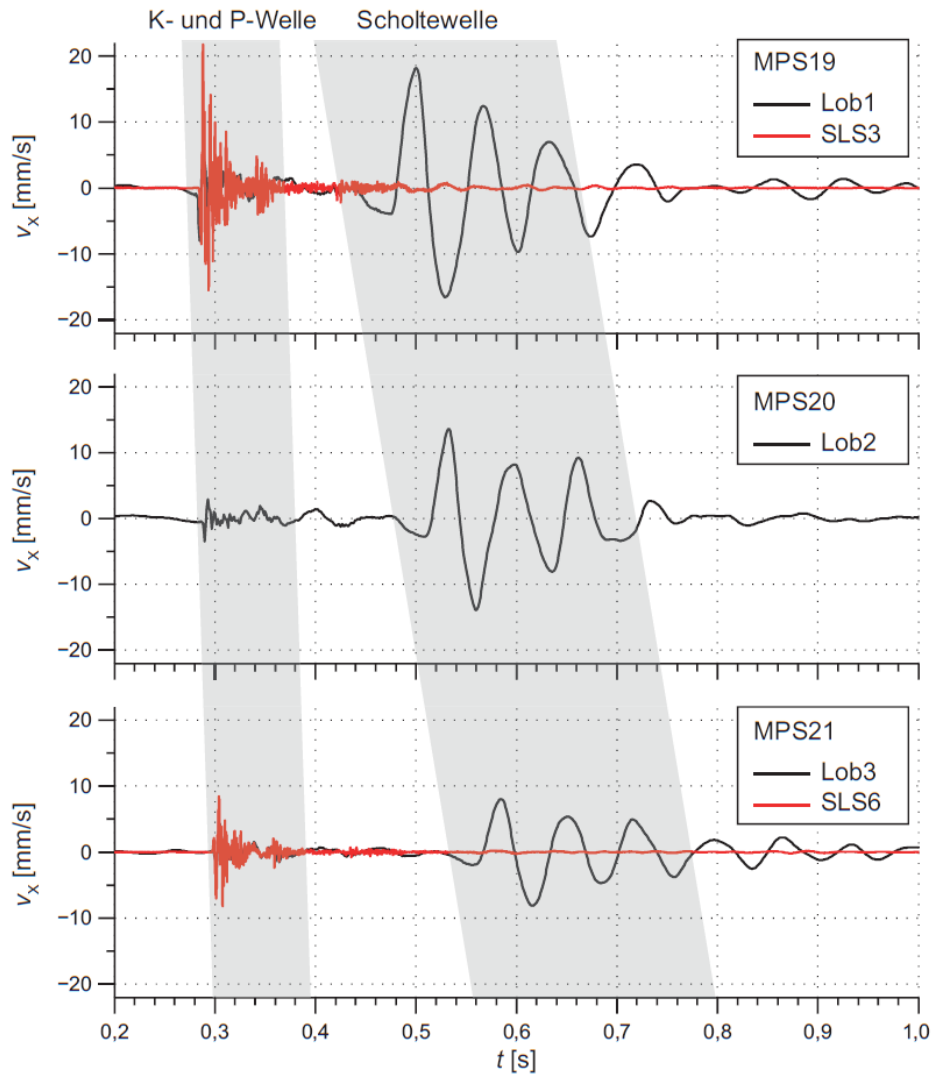


Bild 10: gemessene radiale Schwinggeschwindigkeiten am Meeresboden an drei Messpositionen MPS19 (48,2 m Entfernung), MPS 20 (62,5 m), und MPS 21 (88,8 m) bei einer Monopileinstallation ohne Schallminderungssystem (Siegl, 2017)

2.5 Vorschriften zum Schallschutz im internationalen Vergleich

Die deutsche Vorreiterrolle beim Thema Schallschutz während der Installation von Offshore-Gründungsstrukturen zeigt sich anhand der in Bild 11 dargestellten Übersicht der länderspezifischen Vorschriften verschiedener europäischer Länder (Philipp, 2015).

Noise mitigation	Country-specific regulations						
Parameters	Denmark	Germany	Netherlands	Sweden	UK /Wales / Scotland	Belgium	France
Authority	Danish Energy Agency (DEA)	Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH)	Rijkswaterstaat (Waterwet (Wwv), Water act)	Swedish Agency for marine and Water Management (SwAM)	UK/Wales: „Marine Management Organisation“ Scotland: Marine Scotland Licensing and Operations Team (MSLOT)	Flemish Government, the Department Leefmilieu, Natuur & Energie	Ministère de l'Écologie du Développement durable et de l'Écologie
Softstart	Yes, but not standardised	Yes	Under discussion, most likely yes	Not at present	Yes, but no general rule	Yes, taken up in permit and not standardised	No – at developers discretion
Marine Mammal Observers (MMO)	No	No	No	No	Yes, but no general rule	No	No – at developers discretion
Acoustic Deterrent Devices (ADD)	Yes, recommended but not standardised	Yes, Pinger and Seal scarer	Under discussion, most likely yes	No	Occasionally, judged on case by case basis	Yes, taken up in permit	No – at developers discretion
Seasonal restrictions in piling (for marine mammals)	No	No, not in general	Yes, depending on season and turbine number.	No	Not in general	Yes, but in advise only: no piling between 1st January and 30th April	No – at developers discretion
development in protected areas	Not a priori forbidden	Not a priori forbidden	Not a priori forbidden	Not a priori forbidden	Not a priori forbidden	Not a priori forbidden	Not a priori forbidden
Noise thresholds	Yes, cumulative SEL 183 dB re 1µPa (unweighted) on harbour porpoise	Yes, 160 dB SEL and 190 dB SPL at 750 m from piling event	Yes, depending on season and turbine number.	No	No	No	No
Restrictions on parallel piling	No	Cummulative calculation necessary. Depending on season, OWP location and % impact on protected areas.	Under discussion, most likely no more than one construction activity.	No	No	No	No – at developers discretion

Bild 11: länderspezifische Vorschriften zum Schallschutz während der Installation von Offshore-Gründungsstrukturen (Philipp, 2015)

Auch wenn diese Übersicht aus dem Jahr 2015 bereits einige Jahre alt ist, so hat sie im Wesentlichen auch heute noch weitestgehend Gültigkeit. Die Schallschutzvorgaben sind darin in der vorletzten Spalte (noise thresholds) aufgeführt.

Neben den in Deutschland geltenden Grenzwerten existieren in Dänemark und den Niederlanden Vorgaben. In Dänemark wird ein kumulativer Einzelereignispegel zur Bewertung der Schallemission ermittelt (Danish Energy Agency, 2023). In den Niederlanden ist die Gründungsinstallation saisonal sowie nach der Anzahl der zu installierenden OWEA reguliert (Netherlands Enterprise Agency, 2020)(vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Schallpegelgrenzwerte in den Niederlanden (Netherlands Enterprise Agency, 2020)

Anzahl OWEA, die installiert werden sollen	Schallpegelgrenzwert SEL dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ in 750 m Entfernung zur Schallquelle		
	Januar bis Mai	Juni bis August	September bis Dezember
77-95	165	169	172
76 oder weniger	166	170	174

In den übrigen europäischen Ländern sind derzeit keine Schallpegelgrenzwerte definiert. Dies bedeutet im Umkehrschluss jedoch nicht, dass dort keine Schallminderungssysteme eingesetzt werden müssen. Vielmehr ist der Einsatz auch dort verpflichtend, ohne die konkrete Schallminderungswirkung zu bestimmen.

Gleiches spiegelt sich im auch internationalen Raum wider, da mit der steigenden Nachfrage von regenerativen Energien weltweit, z. B. USA (NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 2018), auch der Einsatz der Offshore-Windenergie und damit die Notwendigkeit der Regulation von Schallschutzmaßnahmen wächst. Aus diesem Grund finden aktuell intensive Diskussionen zu dieser Thematik statt, die zahlreiche Forschungsarbeiten nach sich ziehen werden. Die deutschen sowie europäischen Vorschriften finden in diesem Zusammenhang starke Beachtung.

3 Motivation und Zielsetzung

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist das Systemverhalten zwischen Pfahl, Wasser und Boden während der Rammung von Offshore-Gründungspfählen nicht ausreichend erfasst. Die genauen Mechanismen der Schallübertragung zwischen Pfahl und Wasser, Pfahl und Boden sowie Boden und Wasser sind immer noch nicht genau bekannt. Die fehlende Kenntnis der Korrelation zwischen Pfahldynamik, Hydroakustik und Bodendynamik führt dadurch zu einem unzureichenden Modellverständnis. Insbesondere vom Modell abweichende, nicht plausibel erscheinende Messergebnisse werden oftmals als Messungenauigkeiten bezeichnet bzw. seit dem ESRa-Test der Bodenkopplung zugeordnet. Der Begriff der Bodenkopplung steht hier vielmehr für einen unzureichenden Kenntnisstand bei der Interaktion der beteiligten akustischen Komponenten.

Für die Auswahl und Weiterentwicklung geeigneter Schallminderungsmaßnahmen sind genaue Kenntnisse der Wellenausbreitung und der Interaktionen in diesem komplexen System notwendig. Dies gilt insbesondere bei einem kombinierten Einsatz zweier Schallminderungssysteme, wie er aufgrund der aktuellen technischen Entwicklungen notwendig ist.

Ein weiterer Aspekt ist die zusammenhängende Auswertung und Interpretation der gewonnenen Messdaten zur Charakterisierung der Wellenausbreitungspfade sowie deren Interaktionen. Bei vorhandenen Untersuchungen wurden oftmals Datensätze ausgewertet, die singulär am Pfahl, oder im Wasser oder auf dem Meeresboden an unterschiedlichen Standorten erhoben wurden, aber nicht als zusammenhängende, gleichzeitige Messungen an ein und demselben Standort. Eine Korrelation der singulären Messungen ist daher nicht möglich. Es bedarf daher der Entwicklung eines Untersuchungsprogrammes zur zeitsynchronen Erfassung der Wellenausbreitung in den drei Medien an einem Standort, um neue Erkenntnisse über die Schallausbreitung und -übertragung im Umfeld von Offshore-Rammungen gewinnen und Korrelationen und Zusammenhänge ableiten zu können.

Mit der Durchführung des Messprogrammes und Auswertung der aufgezeichneten Messdaten ist es darüber hinaus möglich, die Wirksamkeit zweier voneinander unabhängiger und unterschiedlicher Schallminderungssysteme einzeln und in Kombination gesichert zu bestimmen.

Der Fokus dieser Arbeit besteht aufgrund der bis dato einzigartigen Möglichkeit der umfangreichen, messtechnischen Begleitung von mehreren in situ Offshore-Gründungsinstallationen bei einem Windpark unter vergleichbaren Randbedingungen explizit in experimentellen Untersuchungen. Der wesentliche Vorteil ist, da es sich um Felduntersuchungen an realen Bauwerkspfählen handelt, dass keine Skalierungs- und Modelleffekte berücksichtigt werden müssen. Die Installationsstandorte sind hinsichtlich Wassertiefe und Geologie nahezu identisch, woraus sehr gute Vergleichbarkeit der Messungen resultiert

Die wesentlichen Ziele dieser Arbeit ergeben sich wie folgt:

- **Entwicklung eines Messkonzeptes** zur zeitsynchronen Beschreibung der Wellenausbreitungsvorgänge und -zusammenhänge im Pfahl, im Wasser und an der Meeresbodenoberfläche im Nah- und Fernbereich während der Installation von Monopile-Gründungspfählen für OWEA bei Einsatz der schallintensiven Impulsrammung.
- **Auswahl geeigneter Sensorik** zur Erlangung der im Messkonzept definierten Ziele zur Beschreibung der Wellenausbreitung. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Robustheit, Wasserdichtigkeit, sowie der Schutz der Sensoren und Kabel insbesondere unter den anspruchsvollen Anforderungen während einer Offshore-Installation zu berücksichtigen.
- **Vorbereitung und Durchführung der Messungen** während der Offshore-Installation mehrerer Gründungspfähle.
- **Auswertung der Messungen** hinsichtlich der Beschreibung der Wellenausbreitungscharakteristik aus Pfahldynamik, Hydroakustik und Bodendynamik. Hierzu sind automatisierte Analysemethoden für Auswertungen im Zeit- und Frequenzbereich sowie zur Ermittlung der Pegelwerte zu entwickeln, um Ausbreitungsgeschwindigkeiten und die Verteilung der Pegelwerte im Wasserkörper zu ermitteln.
- **Untersuchung der Wirksamkeit der Schallminderungssysteme** einzeln und in ihrer Kombination. Durch die Messungen wurde der erstmalige kombinierte Einsatz der Schallminderungssysteme „Großer Blasenschleier“ und „Hydro-Sound-Damper“ begleitet. Ziel ist es, die Effekte der beiden Systeme einzeln und in Kombination im Nah- und Fernbereich zu beschreiben, so dass die industrielle Optimierung und Weiterentwicklung der Systeme zielgerichtet weitergeführt werden kann.
- **Untersuchungen zum Einfluss der Bodendynamik auf den Hydroschallpegel.** Die in der Literatur erwähnte Bodenkopplung soll durch kombinierte Hydroschall- und Erschütterungsmessungen quantifiziert werden, um eine Aussage zum Einflussbereich um den Installationspfahl (Wirkungsradius) herum, sowie deren Größenordnung auf den Pegelwert treffen zu können.

4 Grundlagen der Schallausbreitung

Bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen werden nach aktuellem Stand der Technik Pfähle zur Gründung in den Meeresboden getrieben. Die dazu benötigte Energie wird durch große hydraulische Impuls- oder Hydraulikhämmer erzeugt, die auf dem Pfahlkopf aufgesetzt werden. Durch einen hydraulischen Antrieb wird das Fallgewicht im Hammer angehoben und trifft beschleunigt auf die dem Pfahlkopf aufliegende Schlaghaube. Über diese wird die zur Überwindung des Bodenwiderstandes (Mantelreibung und Spitzendruck) notwendige Impulsenergie in den Pfahl eingeleitet, die sich daraufhin in Form von Wellen im Pfahl fortbewegt. Diese Wellen werden vom Pfahl sowohl ins umgebende Meerwasser als auch den Meeresboden übertragen.

Hierbei entstehen Lärmemissionen, die je nach Entfernung zur Rammbaustelle das Potential haben marine Säuger, Fische sowie andere im Meer lebende Tiere kurz- oder langfristig zu stören, zu vertreiben oder sogar nachhaltig zu schädigen (Lucke, 2007). Die Mechanismen der Schallentstehung und Ausbreitung infolge Pfahlrammung sind sehr komplex und noch nicht abschließend untersucht.

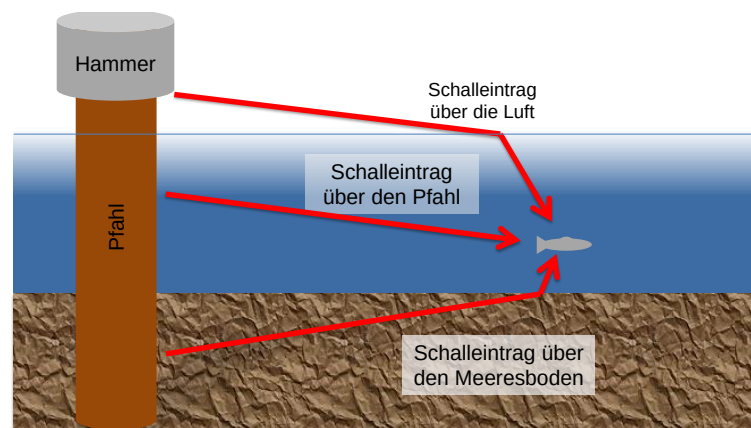


Bild 12: Schalleintragspfade ins Wasser infolge Offshore Pfahlrammung

Der entstehende Schall resultiert aus dem Aufprall des Hammers auf dem Pfahlkopf, wird von dort über die drei verschiedenen Übertragungsmedien Luft, Stahl (Pfahl) und Boden mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in das Wasser eingetragen und über selbiges als Hydroschall zum Empfänger transportiert (Bild 12). Diese verschiedenen Übertragungswege und deren Besonderheiten sollen im Folgenden erläutert werden. Zunächst werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die für die weiteren Betrachtungen und Analysen notwendig sind. Im Anschluss folgt die Übertragung auf die vorliegende Thematik der Offshore-Rammarbeiten.

4.1 Schwingungen und Wellenausbreitung

Generell werden mechanische Schwingungen elastischer Medien als Schall oder auch als Erschütterung bezeichnet. Für die Existenz einer Welle ist zunächst eine Schwingung notwendig. Schwingungen treten in der Natur regelmäßig auf und beschreiben die zeitlich veränderte Bewegung von Teilchen um ihre Ruhelage infolge natürlicher oder künstlicher Veränderung des Deformations- und/oder Spannungszustandes ohne Energietransport. Dies bedeutet, dass zwar ein lokaler Austausch von potenzieller ($E_{pot} = mgh$) und kinetischer Energie ($E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$) erfolgt, jedoch aufgrund des endlichen Systems die Energie, zumindest ohne Dämpfung, im System verbleibt und die Schwingung fortbesteht.

Eine Schwingung ist durch die Periodendauer T [s] sowie die maximale Auslenkung bzw. Amplitude $[A]$ charakterisiert. Ferner lässt sich daraus die Frequenz in der Einheit Hertz [Hz] bzw. $[1/s]$ ermitteln. Sie ist der reziproke Wert der Periodendauer und beschreibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde.

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

Tritt neben einer zeitlichen auch eine räumliche Veränderung der Teilchen auf, wird eine Schwingung als Welle bezeichnet. Bei der Wellenausbreitung findet im Gegensatz zur Schwingung ein Transport von Energie und Impuls statt. Aufgrund der elastischen Kopplung werden auch benachbarte Teilchen in Bewegung versetzt. Deshalb breiten sich Wellen aus und legen folglich einen Weg zurück, während Schwingungen lokal stattfinden. Die in Schwingung versetzten Moleküle bewegen sich lokal um ihre Ruhelage mit einer Schwinggeschwindigkeit v und regen damit die benachbarten schwingungsfähigen Moleküle an, wodurch die Energie und der Impuls weitergegeben werden.

Zur Beschreibung der räumlichen Ausbreitung einer Welle wird die Wellenlänge λ verwendet. Diese gibt den Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenfronten an und wird mithilfe der Wellengeschwindigkeit c und der Periodendauer T oder der Frequenz f als

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} \quad (4.2)$$

beschrieben. Wie sich eine Welle ausbreitet, hängt einerseits von der Art und Stärke der Erregung und andererseits von den Materialeigenschaften des Mediums, in dem sie sich ausbreitet, sowie den vorhandenen Randbedingungen ab. Die Materialsteifigkeiten der Medien, wie Wasser, Boden oder Luft, unterscheiden sich teilweise deutlich. Die

Steifigkeit hat einen maßgebenden Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in einem Medium.

Die Wellenausbreitung wird allgemein auf eine rein elastische Wellenausbreitung reduziert. Dabei wird angenommen, dass sich die Wellen in einem isotropen Medium ausbreiten. Eine Unterteilung der Wellenarten kann nach (Studer et al., 1986) in Raumwellen und Oberflächenwellen erfolgen. Die Raumwellen umfassen die Primär- und die Sekundär-Wellen und existieren in einem Voll- oder auch Halbraum. Sie sind nicht, wie im Falle der Oberflächenwellen, zu denen die Love-Wellen und die Rayleigh-Wellen zählen, an die Existenz einer Grenz- und/oder Oberfläche im Ausbreitungsmedium gebunden. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich je nach Wellenart. Allgemein gilt für die Geschwindigkeit c (Meskouris et al., 2007):

$$c = \sqrt{\frac{\text{Steifigkeit}}{\text{Dichte}}} \quad (4.3)$$

Dementsprechend steigt die Wellengeschwindigkeit mit zunehmender Steifigkeit des Mediums und sinkt mit steigender Dichte, was daran liegt, dass die einzelnen Partikel aufgrund höherer Trägheitskräfte langsamer angeregt werden.

Für Hohlzylinder aus Stahl wird nach Grusel (1998) bei der Ermittlung der Dehnwellengeschwindigkeit zusätzlich die Querdehnzahl berücksichtigt.

$$c_{\text{Dehnwelle, Hohlzylinder}} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (4.4)$$

Bei einer seismischen Anregung des Untergrundes entstehen verschiedene Typen elastischer Wellen, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Richtungen ausbreiten. Raumwellen breiten sich von einem Punkt, der durch einen Impuls angeregt wird, kugelförmig aus. Wird der elastische Halbraum betrachtet, kann die Ausbreitung der Raumwellen als halbkugelförmig beschrieben werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_P der sich parallel zur Ausbreitungsrichtung fortbewegenden Longitudinalwelle ergibt sich nach (Haupt, 1986) aus dem dynamischen Steifemodul und der Dichte zu:

$$c_P = \sqrt{\frac{E_{S,d}}{\rho}} \quad (4.5)$$

P-Wellen breiten sich sowohl in Festkörpern als auch in Flüssigkeiten und Gasen aus. Bei Flüssigkeiten wird anstelle des dynamischen Steifemodul der Kompressionsmodul K eingesetzt.

Gleichzeitig kommt es infolge der Kompressions- und Dilatationsbereiche der P-Welle in radialer Richtung zu Tangentialspannungen, wodurch Transversalwellen generiert werden. Die Partikelbewegungen dieser Scherwellen erfolgen transversal zur Ausbreitungsrichtung. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit c_S ergibt sich zu:

$$c_S = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} \quad (4.6)$$

Scherwellen breiten sich ausschließlich in Feststoffen aus und sind folglich in Fluiden und Gasen nicht vorhanden.

An Grenzflächen entstehen andere Wellentypen, die als Oberflächenwellen bezeichnet werden. Die Hauptart der Oberflächenwellen ist die Rayleigh-Welle, auch R-Welle genannt. Sie entstehen durch die Wechselwirkung der P- und S-Wellen an einer Grenzfläche fest-gasförmig (z. B. Erdoberfläche) und bewegen sich in einer elliptischen Bewegung über den Boden entgegen der Ausbreitungsrichtung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist ähnlich der der Scherwellen und kann für Lockergestein mit $c_R \approx 0,97 \cdot c_S$ angenommen werden (Studer et al., 1986). Die gleiche Wellenart, die sich an der Grenzfläche fest-flüssig folglich zwischen Wasser und Meeresboden ausbreitet, wird nach (Wilken, 2009) als Scholtewelle bezeichnet.

Für eine erste Näherung sind in Tabelle 3 Anhaltswerte für Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten gegeben. Deutlich erkennbar ist beim Sand die große Bandbreite der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in scheinbar identischen Untergrundverhältnissen, die unter anderem auf die Inhomogenität des Bodens, Lagerungsdichte usw. zurückzuführen sind.

Weiterhin hat der Sättigungsgrad einen hohen Einfluss auf die entsprechende Wellengeschwindigkeit. Beispielsweise ist mehr als eine Verdopplung der Wellengeschwindigkeit zwischen trockenem und wassergesättigtem Sand festzustellen. Unter Berücksichtigung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von Wasser liegt die Vermutung nahe, dass ein Großteil der Energie nicht mehr über das Korngerüst, sondern ausschließlich über das Fluid übertragen wird. Biot (1956) und Richard (1979) haben in Untersuchungen gezeigt, dass die Geschwindigkeit der P-Welle in einem Gemisch aus Lockergestein und Flüssigkeit höher liegen kann, als die der reinen Flüssigkeit (Studer, et al., 2007). Da sich das Wasser zwischen den Bodenpartikeln frei bewegen kann, breiten sich S-Wellen ausschließlich über das Korngerüst aus.

Tabelle 3: Geschwindigkeits- und Dichtewerte in verschiedenen Ausbreitungsmedien
(Auszug aus Knödel et al. (2005))

Ausbreitungsmedium	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit		Dichte
	c_P [m/s]	c_S [m/s]	ρ [g/cm³]
Sediment			
Sand	300 – 1500	100 – 500	1,80 – 2,05
- trocken	100 – 600		2,33 – 2,80
- feucht	200 – 2000		1,50 – 2,00
- gesättigt	1300 – 1800		1,80 – 2,05
Material			
Stahl	5122	3230	7,85
Stahl (Dehnwelle bei Hohlzylindern)	5422		7,85
Luft	310 – 343 – 360		$1,29 \cdot 10^{-3}$
Wasser	1430 – 1590		0,98 – 1,01

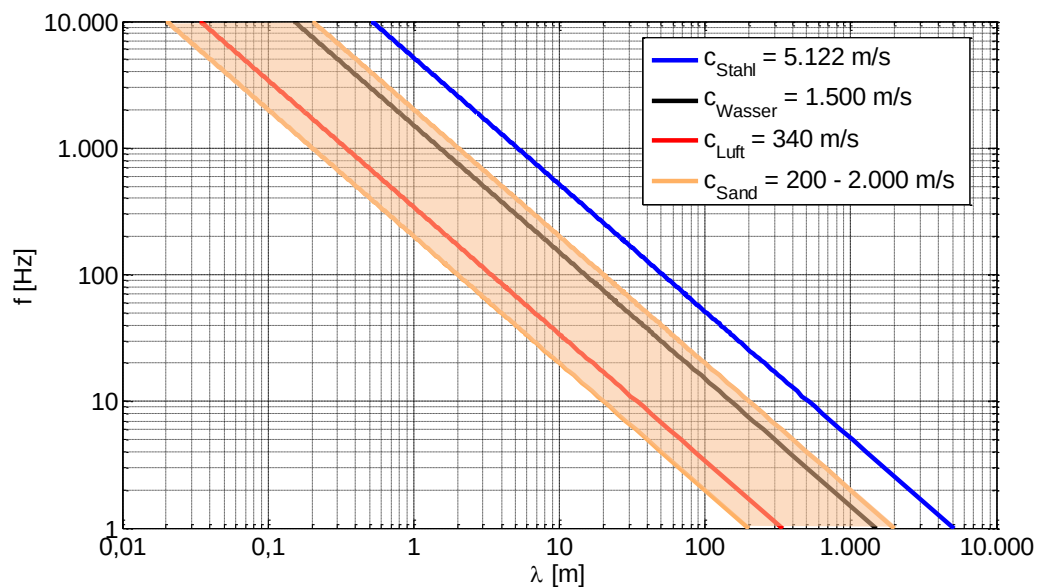


Bild 13: Wellenlängen für Stahl-, Wasser-, Luft- und Bodenschall in Abhängigkeit der Frequenz
Den Einfluss auf die Wellenlänge nach Gleichung (4.2 verdeutlicht Bild 13 exemplarisch für die Medien Stahl, Wasser und Luft. Die sich ergebenden Wellenlängen sind in Abhängigkeit der Frequenz aufgetragen. Aufgrund der Bandbreite im Sand ist dieser Bereich schraffiert. Deutlich wird, dass bei gleicher Frequenz die Wellenlängen im Stahl um ein

Vielfaches größer sind als im Wasser, in der Luft oder im Boden. Des Weiteren resultieren generell aus tiefen Frequenzen verhältnismäßig große Wellenlängen von mehreren Hundert Metern bzw. aus hohen Frequenzen von wenigen Zentimetern.

Wellen werden an Hindernissen, Trenn- oder Begrenzungsflächen in ihrer Ausbreitung beeinflusst. Es wird von einer gestörten Wellenausbreitung durch das Auftreten von Reflexionen und Refraktionen (Beugung oder Brechung) gesprochen. Eine Trennfläche zeichnet sich dabei durch unterschiedliche Materialeigenschaften der einzelnen Medien aus, in denen sich die Wellen ausbreiten.

Im Boden kommt es an Schichtgrenzen zu Reflexionen und Refraktionen, da diese durch Veränderung der die Wellenausbreitung bestimmenden Stoffeigenschaften, Dichte und Steifigkeit, definiert sind. In einem inhomogenen Boden mit kontinuierlicher Veränderung dieser Eigenschaften liegen verschmierte Schichtgrenzen vor. In diesem Fall treten beide Phänomene kontinuierlich auf. Derselbe Effekt tritt selbstverständlich auch an der Grenzfläche Wasser zu Boden und auch Wasser zu Luft auf.

Zur Berücksichtigung der Winkelbeziehung für einfallende und gebrochene Wellen gilt der aus der Optik bekannte Brechungssatz nach Snellius (Meskouris et al., 2007)

$$\frac{\sin(\alpha)}{c_1} = \frac{\sin(\beta)}{c_2} = p = \text{const.} \quad (4.7)$$

Der Quotient des Sinus des Einfallswinkels und der Wellengeschwindigkeit des Mediums 1 entspricht dem Quotienten des Sinus des Ausfallswinkels und der Wellengeschwindigkeit des Mediums 2. Der Strahlparameter p ist auf dem gesamten Laufweg konstant. Demzufolge muss sich der Winkel, den der Strahl mit der Vertikalen bildet, ändern, sobald er in ein Medium mit anderer Ausbreitungsgeschwindigkeit tritt. Läuft er von einem langsamen in ein schnelleres Medium, dann wird er zum Lot auf die Grenzfläche hin gebrochen und umgekehrt. Dies ist zum besseren Verständnis in Bild 14 verdeutlicht.

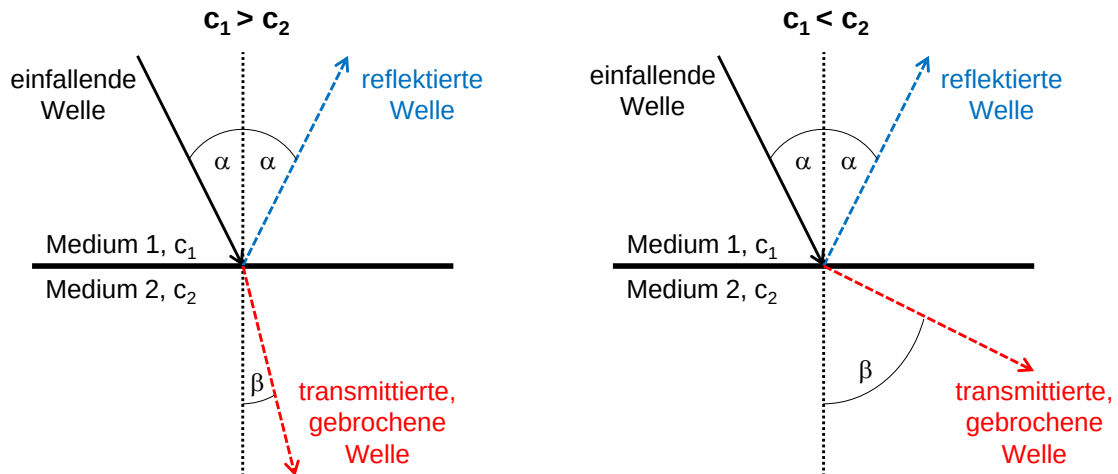


Bild 14: Reflexion und Refraktion an Schichtgrenzen; zwei Schichten mit unterschiedlichen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten c_1 und c_2

Es wird folglich ein Teil der Welle reflektiert und in das gleiche Medium zurückgestrahlt und ein weiterer Teil der Welle gebrochen und in das zweite Medium transmittiert. Die Bestimmung der Wellenrichtung nach Reflexion und Transmission hängt somit ausschließlich von der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der beteiligten Medien und dem Einfallswinkel ab.

Bei den Koeffizienten der Energie- bzw. Amplitudenaufteilung von Reflexion und Transmission kommt zusätzlich eine Abhängigkeit von der Dichte ρ der Medien hinzu. Diese zwei Faktoren können mithilfe der akustischen Kennimpedanz Z , die den Wellenwiderstand des Mediums beschreibt, zu einem Faktor zusammengefasst werden. Diese ist definiert als

$$Z = \rho \cdot c = \frac{p}{v} \quad (4.8)$$

und kann darüber hinaus über das Verhältnis des Schalldruckes p zur Schallschnelle v ermittelt werden. Sie beschreibt die Charakteristik des Mediums, in welchem sich die Wellen ausbreiten. Weiterhin ist sie mit dem Reflexionsindex der Optik vergleichbar, da sich dadurch die transmittierten und reflektierten Anteile berechnen lassen, sobald eine Welle von einem Medium 1 mit der Impedanz Z_1 in ein weiteres Medium 2 mit der Impedanz Z_2 übergeht (Rogowsky, 2005). Der Faktor der Reflexion ist abhängig vom Einfallswinkel der Welle auf die Grenzschicht (Sinambari et al., 2014). Trifft die Welle senkrecht auf die Grenzschicht, lässt sich der Reflexionsfaktor R durch

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.9)$$

bestimmen. Beträgt der Winkel der auftreffenden Welle nicht 90° , so kann der Reflexionsfaktor mithilfe der folgenden Gleichung bestimmt werden

$$R = \frac{Z_2 \cos(\alpha) - Z_1}{Z_2 \cos(\alpha) + Z_1} \quad (4.10)$$

Je stärker sich Z_1 und Z_2 unterscheiden, desto mehr nähert sich R dem Wert 1 (schallhart) bzw. -1 (schallweich), d.h., es kommt zu einer vollständigen Reflexion.

Der Transmissionsfaktor T berechnet sich für den senkrechten Fall durch

$$T = 1 - |R| \quad (4.11)$$

Im Fall von $R = 0$ sind die Medien identisch und es kommt zu einer reinen Transmission. Während der Reflexions- bzw. Transmissionsfaktor das Verhältnis der Schalldruckamplituden der reflektierten zur transmittierten Welle beim Übergang in ein anderes Medium angibt, stellt der Reflexionsgrad r als Quadrat des Reflexionsfaktors die energetische Größe dazu dar.

$$r = R^2 \quad (4.12)$$

Analog dazu der Transmissionsgrad τ :

$$\tau = 1 - R^2 \quad (4.13)$$

Da die Schallkennimpedanz eine wesentliche Wirkung auf Reflexion und Transmission ausübt und dies für die Bearbeitung der vorliegenden Thematik von Bedeutung ist, sind in Tabelle 4 Anhaltswerte aufgeführt.

Tabelle 4: Schallkennimpedanz verschiedener Materialien

Stoff	Schallkennimpedanz Z
	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} = \frac{\text{Ns}}{\text{m}^3}$
Luft (20 °C)	414
Wasser (20 °C)	1 480 000
Stahl	39 000 000
Sand gesättigt	2 340 000 – 3 690 000

Bei dynamisch beanspruchten Systemen treten Energieverluste auf, die unter dem Begriff Dissipation oder Dämpfung zusammengefasst werden. Zum einen verteilt sich die in der Welle enthaltene Energie aufgrund der geometrischen Ausbreitung des Wellenfeldes und der damit verbundenen Vergrößerung. Dieses Phänomen wird auch als geometrische Dämpfung oder Abstrahlungsdämpfung bezeichnet, wenn auch keine „echte“

Dämpfung vorliegt. Als Folge des Energieverlustes kommt es zu einer zeitlichen Abnahme der Schwingungsamplitude. Je größer der Dämpfungsgrad D des Systems ist, desto stärker nimmt die Amplitude der Schwingung ab.

Nach (DGGT, 2002) kann die Amplitude einer Welle an einem bestimmten Punkt mit dem Abstand x_2 von der Quelle durch

$$A_{\text{geo}} = A_{x_1} \cdot \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^{-n} \quad (4.14)$$

beschrieben werden.

Hierbei gibt x_1 den Abstand eines Punktes von der Quelle an, an dem die Amplitude bekannt sein muss, und A mit dem entsprechenden Index den Wert der Amplitude. Die Variablen mit dem Index 1 geben folglich Referenzwerte an, welche bekannt sein müssen. Der Exponent n hängt vom Wellentyp sowie der Wellenquelle ab und kann Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Dämpfungsexponent n zu Formel 4.14 (DIN 4150-3)

Schwingungstyp	Wellenquelle	Wellentyp	
		Raumwelle	Oberflächenwelle
Harmonisch / stationär	Punktquelle	1,0	0,5
	Linienquelle	0,5	0
impulsförmig	Punktquelle	1,5	1,0
	Linienquelle	1,0	0,5

Wird der Quotient der beiden Entfernungen als Faktor $r = x_2/x_1$ definiert, lässt sich die geometrische Dämpfung grafisch wie in Bild 15 darstellen.

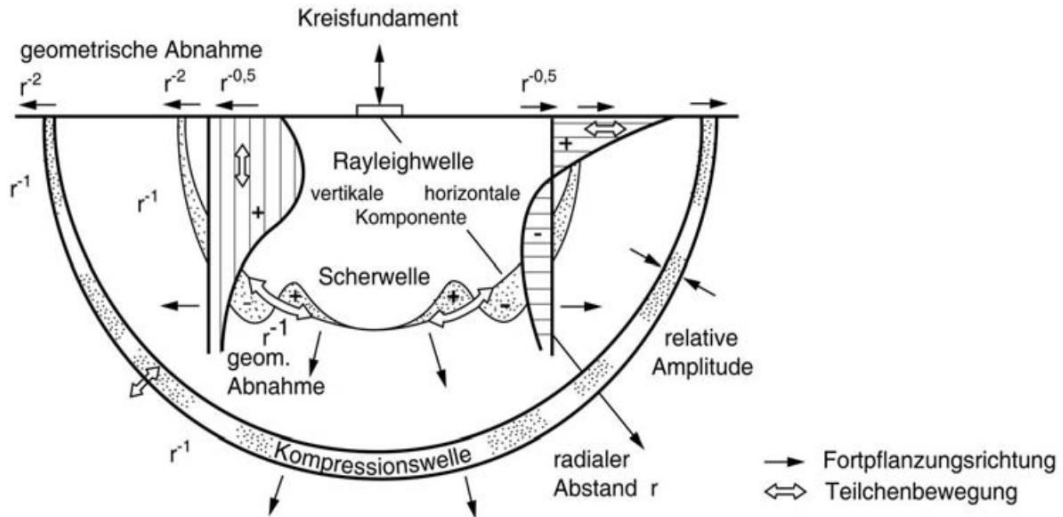


Bild 15: Wellenausbreitung an einem dynamisch belasteten Kreisfundament (Vrettos, 2008)

Der andere Anteil der Dämpfung ergibt sich aus der Bewegung der einzelnen Bodenpartikel und fortlaufenden Umwandlung von potentieller in kinetische Energie und umgekehrt. Diese Umwandlung ist aufgrund von Reibungen an Korngrenzen und der Entstehung von Wärme nicht verlustfrei und wird Materialdämpfung genannt. Sie ist im Vergleich zur geometrischen Dämpfung nur von geringer Bedeutung, da die Dehnungsamplituden und die damit verbundene Arbeit bei Erschütterungen im Boden nur sehr gering sind. Die Materialdämpfung ist in der Nähe der Erschütterungsquelle am größten, da dort die größten Dehnungsamplituden auftreten (Studer et al., 2007).

Die Amplitudenabnahme infolge Materialdämpfung kann nach (DGGT, 2002) bestimmt werden zu

$$A_{\text{Mat}} = A_{x_1} \cdot e^{-\alpha(x_2 - x_1)} \quad (4.15)$$

Darin stellt der Abklingkoeffizient α als Maß für die Dämpfung in der Einheit [1/m] keine reine Materialgröße dar, sondern ist zusätzlich abhängig von der Wellenlänge.

$$\alpha = \frac{\psi}{2\lambda} \quad (4.16)$$

Werden die beiden Dämpfungsarten kombiniert, folgt daraus die Gleichung

$$A_{x_2} = A_{x_1} \cdot \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{-n} \cdot e^{-\alpha(x_2 - x_1)} \quad (4.17)$$

Eine Beispielrechnung soll die Zusammenhänge verdeutlichen, wobei folgende Werte für die Ermittlung von A angenommen werden:

Tabelle 6: Eingangswerte für Amplitudenermittlung

Variable	Wertebereich	Einheit
A_{x1}	1	[-]
x_1	1	[m]
x_2	{25;50;100;200;750}	[m]
n	0,5	[-]
ψ	0,5	[-]
c	1600	[m/s]
f	{1...1000}	[Hz]

Das Ergebnis für die beiden Dämpfungsarten getrennt nach den Gleichungen (4.14 und (4.15 zeigt Bild 16, die Kombination der beiden nach Gleichung (4.17

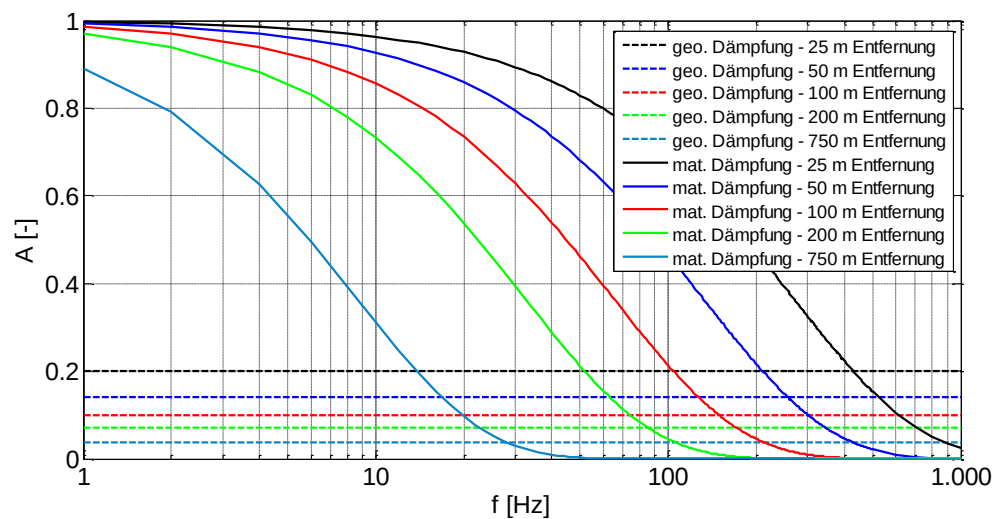


Bild 16: Einfluss der geometrischen Dämpfung und der Materialdämpfung auf die Amplitude

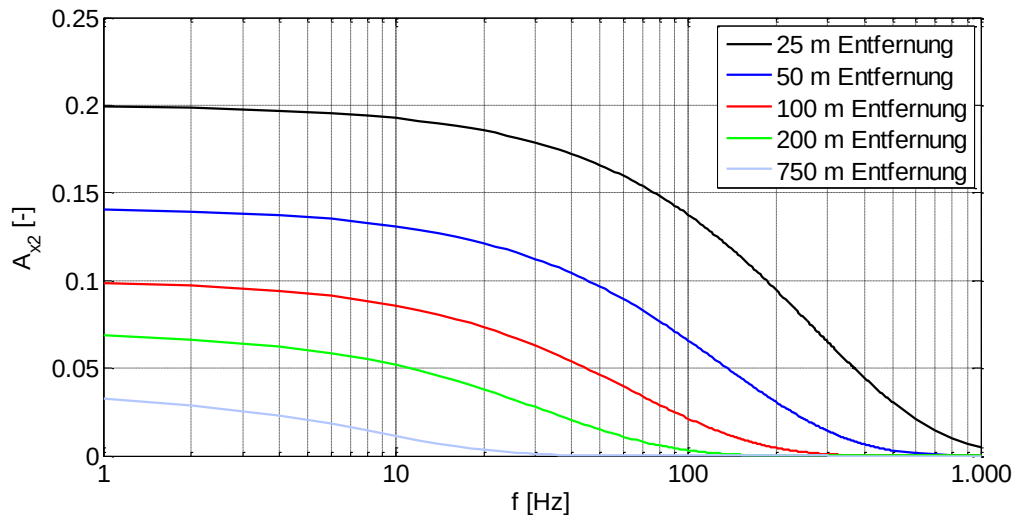


Bild 17: gedämpfte Amplitude nach geometrischer und Materialdämpfung

In den Diagrammen sind für unterschiedliche Distanzen in Abhängigkeit der Frequenz die analytisch ermittelten resultierenden Amplituden A_{x2} dargestellt. Als Eingangsparameter wurden entsprechend der Tabelle 5 die Randbedingungen für eine impulsförmige Linienquelle mit der Amplitudenabnahme für eine Oberflächenwelle gewählt.

Je größer die Entfernung zur Quelle wird, desto mehr nehmen die Schwingungsamplituden ab. Das Beispiel zeigt weiterhin, dass infolge ausschließlich geometrischer Dämpfung die Amplitude frequenzunabhängig bereits nach 25 m auf 20 %, in 200 m auf etwa 7 % reduziert wurde. Bei der Materialdämpfung zeigt sich die Frequenzabhängigkeit. Sie nimmt exponentiell mit steigenden Frequenzen zu. Tiefe Frequenzen (< 10 Hz) bis zu einer Entfernung von 200 m werden vergleichsweise gering um etwa 25 % gemindert. In der Literatur wird häufig die Aussage getroffen, dass sich Wellen mit hohen Frequenzen und dementsprechend kleinen Wellenlängen nicht im Lockergesteinsboden ausbreiten (Lorenz et al., 2004). Dieses Beispiel bestätigt diese Aussage. Es wurde mit einer relativ hohen Anfangsamplitude durchgeführt. Wird eine entsprechend kleine Amplitude gewählt, kann davon ausgegangen werden, dass hochfrequente Wellenanteile in größerer Entfernung nicht mehr registriert werden.

4.2 Schalleintrag von der Luft ins Wasser

Durch den Aufprall des Hammers auf den Pfahl kommt es oberhalb der Wasseroberfläche zu Schallwellen, die sich in der Luft mit etwa $c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m/s}$ fortbewegen, theoretisch in das Meerwasser eindringen und sich dort weiter ausbreiten können.

Eine einfache Berechnung des Reflexionsfaktors nach Gleichung 4.10 bei senkrechtem Einfall mit Hilfe der in Tabelle 4 aufgeführten Impedanzen ergibt einen Wert von

$$R_{\text{Luft-Wasser}} = \frac{1\,480\,000 - 414}{1\,480\,000 + 414} = 99,9 \, \%$$

Je nachdem aus welchem Medium die Welle einfällt, ist der Reflexionsgrad positiv oder negativ und nah an 1 d. h. einer Totalreflexion. Aus diesem Grund ist Luftschall im Wasser kaum hörbar und umgekehrt. Nach (DEGA, 2006) kann Luftschall nur unter einem Einfallswinkel von kleiner etwa 14° in das Wasser eindringen. Schallwellen mit größerem Einfallswinkel werden vollständig reflektiert. Dieser Übertragungsweg trägt somit nur zu einem sehr geringen Teil zu dem entstehenden Hydroschall bei (Koschinski et al., 2013).

4.3 Pfahldynamik - Schalleintrag vom Pfahl ins Wasser

Durch den Aufprall des Fallgewichtes auf den Pfahl wird dieser deformiert und die Energie in Form einer Dehnwelle in den Pfahlkopf eingeleitet. Die Dauer eines Schlages ist dabei sehr kurz und beträgt etwa 4 bis 5 ms. Während des Kontaktes baut sich eine Dehnwelle im Pfahl auf, die sich mit einer Geschwindigkeit von etwa $c_{\text{Stahl}} = 5.122 \text{ m/s}$ vom Pfahlkopf zum Pfahlfuss hinbewegt. Infolge der Dehnwelle kommt es entlang der Pfahlachse zu einer Ausbauchung des Pfahlquerschnittes, die dazu führt, dass die den Pfahlmantel umgebenden Medien Luft, Wasser und Boden in Schwingungen versetzt werden. Diese in Schwingung versetzten Teilchen regen wiederum benachbarte Teilchen an und geben Energie weiter, wodurch es zu einer Wellenausbreitung in den Medien kommt. Die Dämpfung der Dehnwelle im Bereich des Wassers ist dabei sehr gering. Da sich die Dehnwelle zeitabhängig im Pfahl fortbewegt, wird eine geneigte Wellenfront im Wasser über die gesamte benetzte Pfahllänge erzeugt, die sich omnidirektional als Hydro- und Bodenschall in radialer Richtung vom Pfahl ausbreitet (Bild 18). Die Neigung der Wellenfront zur Vertikalen wird Schallausbreitungswinkel β genannt und errechnet sich nach Dahl et al. (2011) aus dem Verhältnis der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Stahl und angrenzendem Medium mit

$$\sin \beta = \frac{c_{\text{angrenzendes Medium}}}{c_{\text{Stahl}}} \quad (4.18)$$

Bei Stahl und Wasser ergibt sich dieser zu etwa $\beta_w \approx 17^\circ$. Erreicht die Dehnwelle den Meeresboden verändert sich die Neigung der Wellenfront aufgrund anderer Materialparameter. Anstelle von c_{Wasser} rückt dann die üblicherweise etwas höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit des anstehenden Bodens $c_{p,\text{Sediment}}$. Die Neigung der Wellenfront im Boden ist somit etwas flacher und beträgt $\beta_s \approx 20^\circ$.

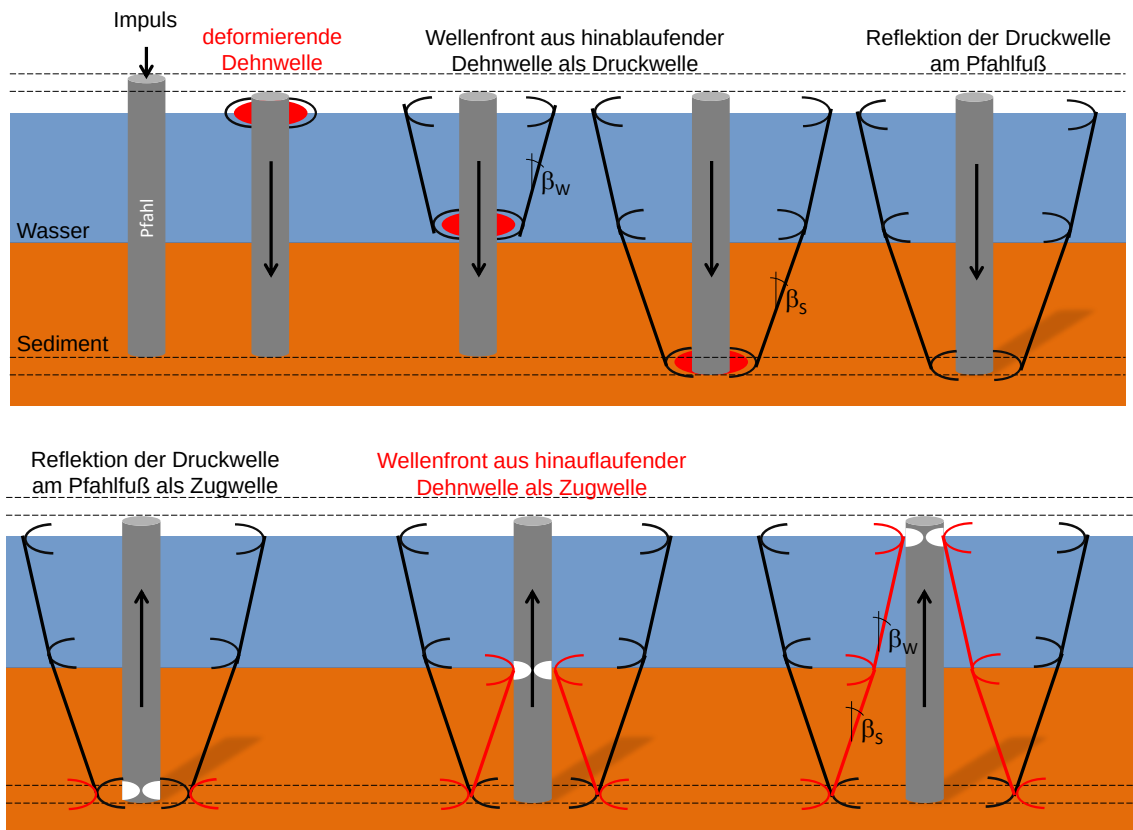


Bild 18: Wellenfront infolge der initialen Dehnwelle im Pfahl bei freier Auflagerung

Die Dehnwelle durchläuft den Pfahl auf gesamter Länge und wird am Fuß reflektiert. Der Reflexionsgrad ist dabei abhängig von der Lagerung des Pfahles (Bild 19). An einem freien Ende wird die Druckwelle als Zugwelle reflektiert. Bei hohem Bodenwiderstand liegt eine nahezu eingespannte Auflagerung vor, bei der die Druckwelle als Druckwelle reflektiert wird. In diesem Fall ist keine Verschiebung möglich, so dass für einen weiteren Vortrieb beispielsweise die Rammenergie erhöht werden muss.

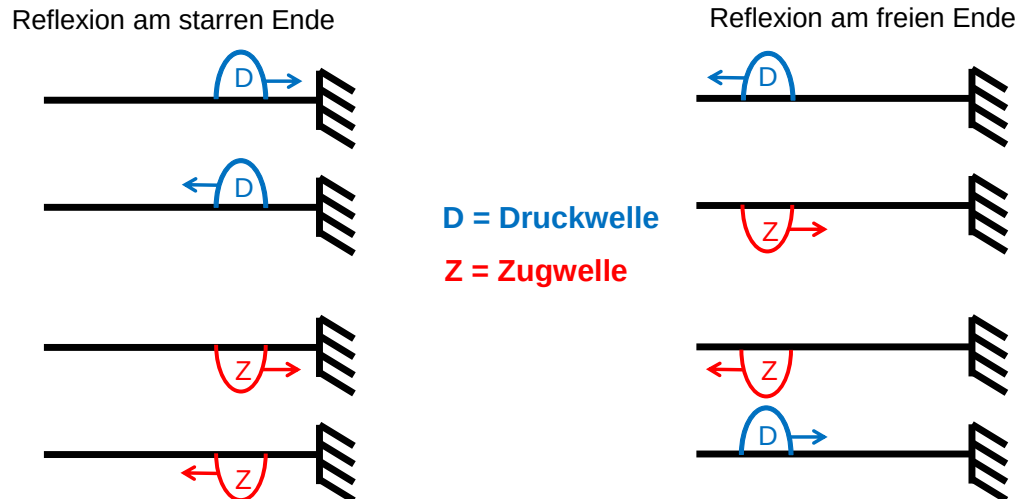


Bild 19: Reflexion von Wellen an den Grenzflächen bei einem Dehnstab

4.4 Bodendynamik - Schalleintrag vom Boden ins Wasser

Die den Pfahl durchlaufende Dehnwelle wird im Bereich der Einbindung vom Boden gedämpft. Dennoch überträgt sie ähnlich wie beim Wasser die Energie über den Pfahlmantel sowie den Pfahlfuss in den Meeresboden. Hierbei entstehen Kompressionswellen, ähnlich der Hydroschallwelle, und Scherwellen, die sich im Meeresboden ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall im Boden ist größer als im Wasser, sodass diese Schallwellen schon vor den durch das Wasser übertragenen Schallwellen an einem Ort mit gleicher Entfernung zur Schallquelle eintreffen (Elmer et al., 2007). Diese Wellen beschränken sich auf deutlich kleinere Frequenzen ($\ll 200$ Hz). Ein Teil dieses Schalls streut wieder in das Wasser ab und trägt damit zum Hydroschall bei. Wie groß dieser Anteil auf den Hydroschallpegel ist, wurde versucht durch numerische Berechnungen abzuleiten. Quantitative Aussage sind jedoch nicht in der Literatur zu finden. Beim ESRa-Test wurde der Bodeneinfluss im direkten Nahbereich um den Rammpfahl auf 2 – 3 dB SEL geschätzt (Wilke, et al., 2012), ohne dies durch Berechnungen zu hinterlegen. Auch für die im Boden auf die Grenzfläche zum Wasser treffenden Wellen werden im Folgenden die Reflexions- und Transmissionsfaktoren für senkrechten Einfall ermittelt.

$$R_{\text{Boden-Wasser}} = \frac{2\,340\,000 \dots 3\,690\,000 - 1\,480\,000}{2\,340\,000 \dots 3\,690\,000 + 1\,480\,000} = 22,5 \dots 42,8 \%$$

In diesem Fall ist demnach theoretisch ein Einfluss des Bodens auf den Hydroschall möglich.

4.5 Hydroakustik - Besonderheiten der Schallausbreitung im Wasser

Aufgrund der verschiedenen Eigenschaften von Wasser, Luft und Boden ist die Schallausbreitung im Wasser nicht mit der an der Luft zu vergleichen. So können Schallereignisse im Wasser ähnlich wie im Boden (z. B. Erdbeben) in deutlich größeren Entfernungen (>50 km) wahrgenommen werden, als in der Luft (Veit, 1979). Grundsätzlich nimmt die Schallgeschwindigkeit c mit einer Zunahme der Steifigkeit und einer Abnahme der Dichte eines Mediums zu. Da Wasser keine Scherfestigkeit besitzt, wird anstelle der Steifigkeit in Gleichung (4.5 die Kompressibilität K gesetzt. Der Zusammenhang lässt sich durch Formel (4.19 beschreiben zu

$$c_{Wasser} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \left[\frac{m}{s} \right]. \quad (4.19)$$

Die Ausbreitung der Schallwellen im Wasser erfolgt mit einer Geschwindigkeit von etwa 1.500 m/s. Aufgrund der Varianz von Wassertiefe z , Wassertemperatur ϑ und Salinität S schwankt dieser Wert i. d. R. um ± 50 m/s. In Abhängigkeit dieser Parameter lässt sich die Schallgeschwindigkeit nach (Medwin, 2005) genauer bestimmen zu:

$$c_{Wasser} = 1449,2 + 4,6 \cdot \vartheta - 0,055 \cdot \vartheta^2 + 0,00029 \cdot \vartheta^3 + (1,34 - 0,010 \cdot \vartheta) \cdot (S - 35) + 0,016 \cdot z \quad (4.20)$$

ϑ : Temperatur [°C]

S : Salinität [‰]

z : Wassertiefe [m]

Die geometrische Ausbreitungsdämpfung des Hydroschalls wird üblicherweise analog zur Analyse akustischer Messungen in Pegelwerten angegeben. Aufgrund der größer werdenden Wellenfront mit zunehmendem Abstand von der Quelle nimmt der Schalldruck und somit auch der Schallpegel ab (DEGA, 2006). Mit Formel (4.21 lässt sich die Abnahme des Schalldrucks mit zunehmender Entfernung durch einen einfachen logarithmischen Zusammenhang beschreiben. Die Formel bezieht sich auf die Schallausbreitung in der Nordsee. Die geometrische Ausbreitungsdämpfung wird als Transmission Loss (TL, Übertragungsverlust) bezeichnet und allgemein unter der Bedingung $R_1 < R_2$ berechnet nach:

$$TL = k \cdot \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right) [dB] \quad (4.21)$$

TL Transmission Loss

R_1 Entfernung zur Schallquelle mit bekannter Amplitude

R_2 Entfernung zur Schallquelle mit unbekannter Amplitude

k Faktor zur Pegelkorrektur

Diese Formel stellt jedoch nur eine überschlägige Berechnung dar, da hierbei nicht die frequenzabhängige Abnahme des Schalldrucks berücksichtigt wird und die Formel erst im akustischen Fernfeld gilt. Der Faktor k zur Beschreibung der Pegelkorrektur je Dekade liegt in einem unbegrenzten Medium theoretisch zwischen $k = 10$ ($TL = 3$ dB) für eine Zylinderwelle und $k = 20$ ($TL = 6$ dB) für eine Kugelwelle (DEGA, 2006). Für die Nordsee ist nach (Umweltbundesamt, 2011) $k = 15$ ($TL = 4,5$ dB) vorgeschrieben.

Ein weiterer Effekt der Schallausbreitung im Wasser, ist die dispersive oder auch frequenzabhängige Wellenausbreitung (Möser, 2012). Es kommt zu einer Signalverzerrung über große Distanzen, wodurch in unterschiedlichen Abständen von einer Quelle unterschiedlich zusammengesetzte Schwingungen wahrgenommen werden. Diese, in größeren Entfernungen zu beobachtende frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung, kann nach (Thiele, 2002) beschrieben werden zu:

$$TL(f) = (16,07 + 0,185 \cdot 10 \log(f)) \cdot (\log(R) + 3) + R(0,174 + 0,046 \cdot 10 \log(f) + 0,005 \cdot (10 \log(f))^2) \quad (4.22)$$

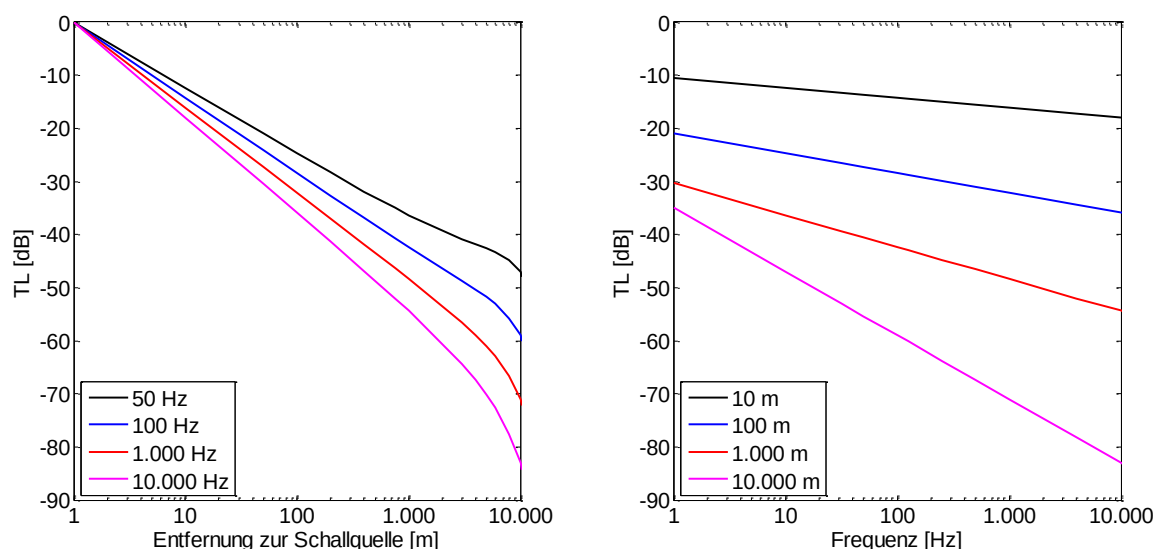


Bild 20: Ausbreitungsdämpfung $TL(f)$ nach Thiele (2002) in Abhängigkeit der Entfernung und Frequenz

Wie Bild 20 zeigt, steigt die Dämpfung mit steigender Frequenz an und erreicht bei erfahrungsgemäß für Offshore-Rammungen üblichen Frequenzen von etwa 100 Hz bis 500 Hz Werte zwischen 40 dB und 45 dB für einen Abstand von 750 m. Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Ausbreitungsdämpfung mit Hilfe halb-empirischer Ausbreitungsformeln wurde von Rustemeier et al. (2012) veröffentlicht.

Die Nordsee in der Deutsche Bucht wird aufgrund der für Windparks üblichen Wassertiefen bis etwa 40 m als Flachwasser bezeichnet. Für diesen Fall ist die untere Grenzfrequenz f_0 zu beachten, unterhalb derer eine Ausbreitung von Schallwellen theoretisch nicht möglich ist, d. h. der Schall wird unterhalb dieser Frequenz sehr stark gedämpft (Elmer et al., 2007). Die untere Grenzfrequenz nach Urick (1983) hängt von der Wassertiefe und den Schallgeschwindigkeiten im Wasser und Sediment ab und lässt sich ermitteln durch

$$f_0 = \frac{c_{Wasser}}{4 \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - (c_{Wasser}/c_{Boden})^2}} \quad (4.23)$$

In Bild 21 ist die untere Grenzfrequenz f_0 in Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeit am Boden für verschiedene Wassertiefen mit $c_W = 1490$ m/s dargestellt. Für Wassertiefen zwischen 20 m bis 40 m ist mit einer Ausbreitung von Frequenzen oberhalb von 20 Hz bis 30 Hz zu rechnen. Die Frequenz ist umso höher, je flacher das Wasser ist (Medwin, 2005).

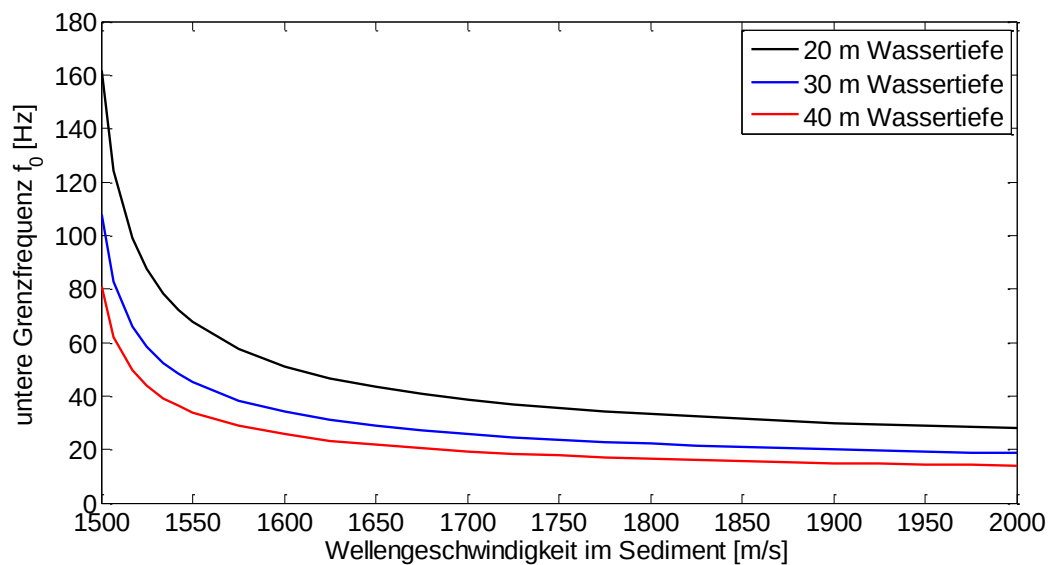


Bild 21: untere Grenzfrequenz in Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeit am Boden für verschiedene Wassertiefen

Des Weiteren kommt es zu einer Signalverzerrung durch Schallreflektion. Von der Schallquelle ausgehend kann sich der Schalldruck sowohl direkt als auch indirekt zu einem Empfänger bewegen. Der Schall wird, wie in Bild 22 dargestellt, sowohl vom Meeresboden als auch an der Wasseroberfläche reflektiert. Somit kann der Empfänger durch mehrfache Reflektion über einen längeren Zeitraum immer wieder den Schalldrücken

ein und derselben Schallquelle ausgesetzt werden. Zu berücksichtigen sind die durch die Reflektion entstehenden Verluste.

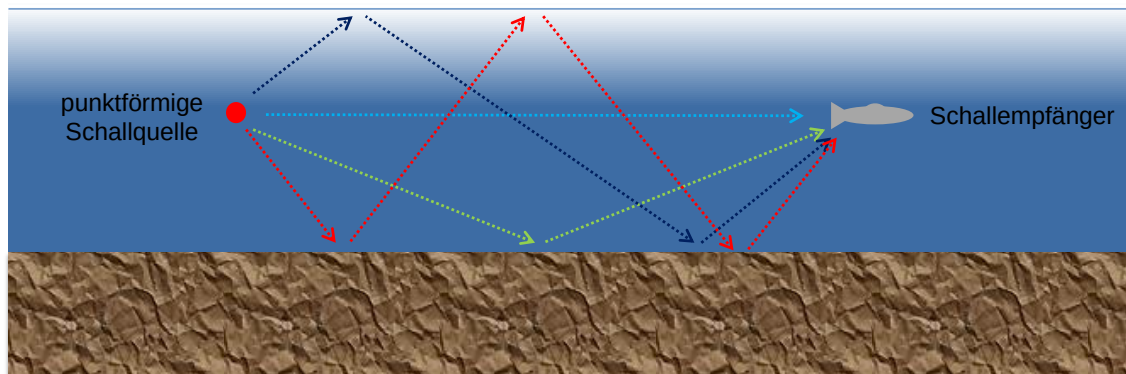


Bild 22: verschiedene Übertragungswege von Schall im Wasser

In Gewässern kann es zu ungleichmäßigen Schallprofilen kommen, die sich wesentlich auf die Schallabstrahlung auswirken (Gerdes et al., 2014). In Bild 23 sind vier unterschiedliche Varianten dargestellt. Bei einem gut durchmischten Gewässer hinsichtlich Salzgehalt und Temperatur nach Variante a) ist die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit über die Wassersäule konstant. Dieser Fall trifft auf die Nordsee zu, die infolge der Gezeitenströmung gut durchmischt ist. Die Schallstrahlen breiten sich gradlinig von der Quelle S aus. In den Varianten b) und d) ist das Profil geneigt, was zu einer Beugung der Schallstrahlen führt. In Variante c) liegt das Minimum der Schallgeschwindigkeit innerhalb der Wassersäule. Dies bewirkt, dass sich Schallwege einstellen, bei denen der Schall weder die Wasseroberfläche noch den Meeresboden erreicht. In diesem Fall treten kaum Reflexionsverluste auf. Diese Variante kann in stehenden Gewässern wie z. B. der Ostsee auftreten.

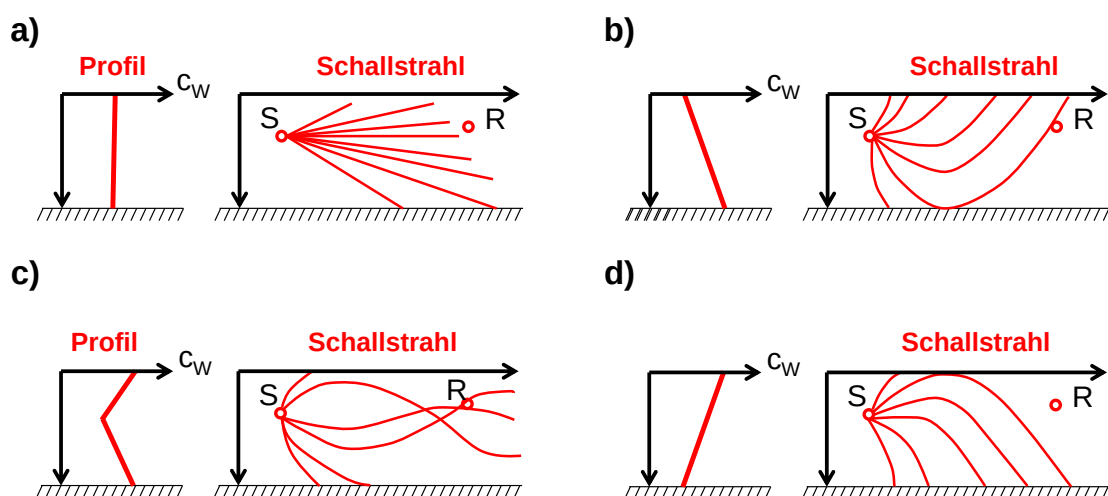


Bild 23: Schallausbreitung bei unterschiedlichen Schallprofilen

Bei der Schallausbreitung wird zwischen dem akustischen Nahfeld und Fernfeld unterschieden. Im Fernfeld breiten sich Schalldruck p und Schallschnelle v in Phase aus und sind nach Formel (4.8) näherungsweise über die akustische Impedanz verknüpft. Im Nahfeld kommt es bei nicht ebenen Wellenfeldern, wie es bei Kugel- oder Zylinderwellen der Fall ist, zwischen Druck und Schnelle zu einem Phasenversatz von 90° , wodurch die Impedanz komplex wird. Die Lösungen der Wellengleichungen unterscheiden sich somit zu denen im Fernfeld. Die genaue Grenze ist schwer abzuschätzen. Nach DEGA (2006) ist die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld frequenzabhängig und fließend:

$$\text{Nahfeld} \quad R \ll \lambda \quad (4.24)$$

$$\text{Fernfeld} \quad R \gg \lambda \quad (4.25)$$

Bild 24 verdeutlicht den formalen Zusammenhang grafisch. Für den blau schraffierten maßgeblichen Frequenzbereich für Rammimpulse (vgl. Bild 6) liegt die Grenze je nach Frequenz zwischen Nah- und Fernfeld im Wasser zwischen 3 m und 19 m.

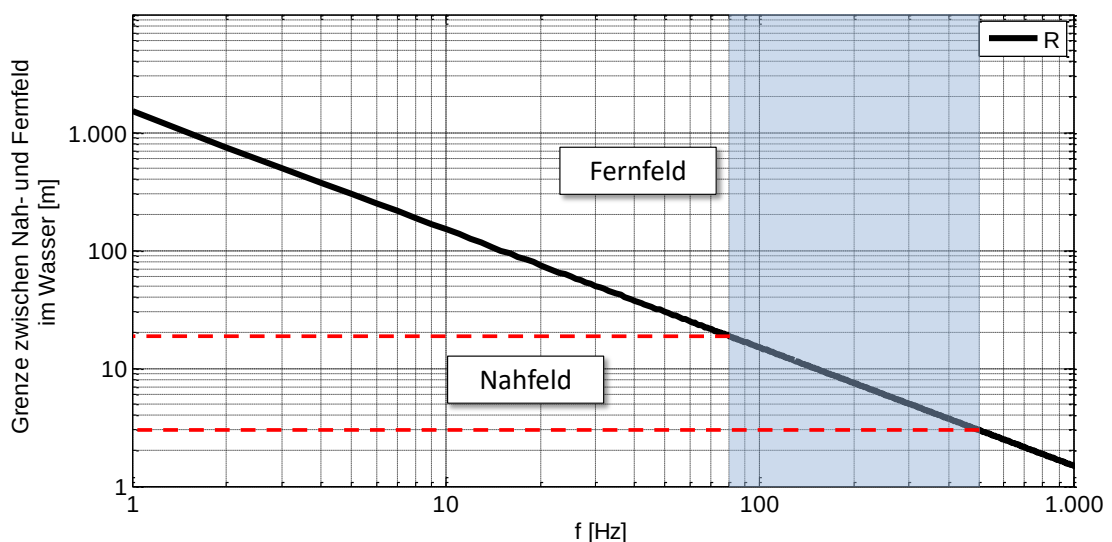


Bild 24: Grenze zwischen Nah- und Fernfeld im Wasser über die Frequenz bei $c_w = 1.500 \text{ m/s}$

4.6 Einflussfaktoren auf die Schallausbreitung im Wasser

Die Schallausbreitung im Wasser und der abgestrahlte Schallpegel hängen von vielen verschiedenen Einflussfaktoren ab. Da die im Folgenden aufgeführten Faktoren auch in Wechselwirkung zueinanderstehen, sind genaue Angaben über den Einfluss eines einzelnen Faktors schwierig. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die maßgebenden Faktoren und wenn möglich deren Einfluss auf die Pegelwerte. Weitere Abhängigkeiten sind in Bellmann et al. (2020) nachzulesen.

Maßgebenden Einfluss auf die Schallausbreitung hat der Rammhammer. Bild 25 zeigt die Terzanalysen von zwei Rammimpulsen von den zwei Hammertypen Menck MHU 270T (blau) und IHC S1400 (rot) ermittelt bei den Offshore Rammungen beim ESRA-Test 2011 sowie beim Windpark London Array 2012 bei ähnlicher Rammenergie von etwa 300 kJ.

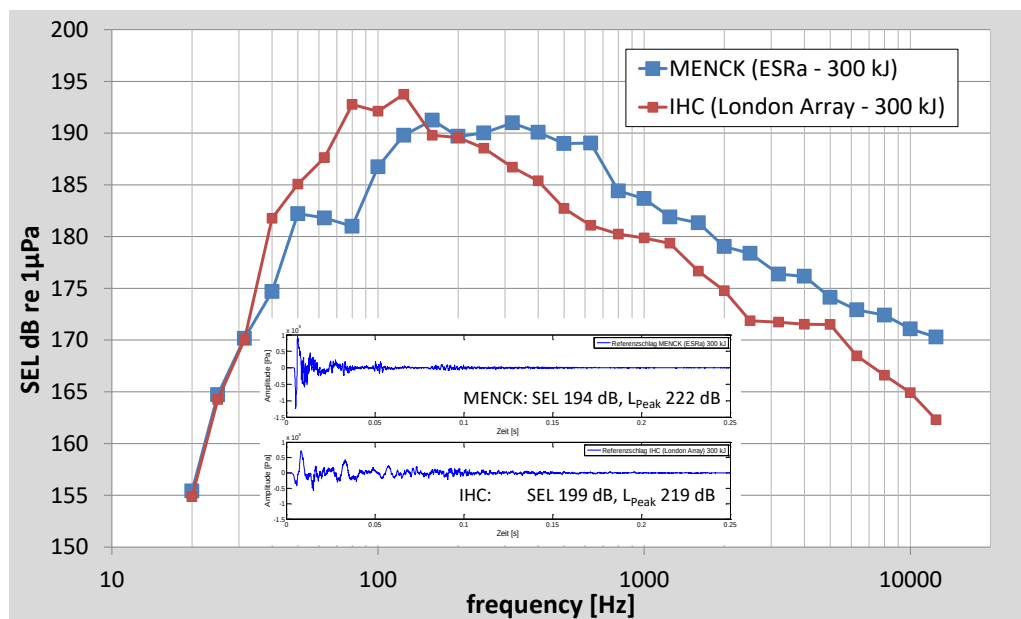


Bild 25: Terzanalyse von zwei Rammimpulsen mit zwei unterschiedlichen Hammertypen bei gleicher Rammenergie ermittelt in etwa 10m Entfernung zum Rammpfahl ohne den Einsatz von Schallminderungssystemen (Bruns, 2014)

In beiden Kurvenverläufen ergibt sich ein ähnlicher Maximalpegel von 192 – 194 dB SEL. Es fallen jedoch Unterschiede in den frequenziellen Anteilen der Rammimpulse auf. Der SEL steigt beim IHC-Hammer bei Frequenzen bis 80 Hz steil an, besitzt das Maximum im Bereich von etwa 194 dB zwischen 80 Hz bis 125 Hz und fällt oberhalb von 125 Hz kontinuierlich auf einen Wert von 162 dB ab. Als Summenpegel SEL des

Schallereignisses ergibt sich ein Wert von 199 dB. Beim Menck-Hammer steigt der Pegel etwas flacher an, bis er sein Maximum ab 125 Hz mit etwa 192 dB erreicht. Dieses bleibt bis zu einer Frequenz von etwa 600 Hz konstant und sinkt oberhalb dieser Frequenz auf einen SEL von 170 dB ab. Für dieses Rammschallereignis ergibt sich ein Wert von 195 dB SEL.

Deutlich wird zudem, dass in beiden Rammimpulsen die höchsten Pegelwerte zwischen 80 und 500 Hz auftreten. In diesem Frequenzbereich ist eine Schallminderung folglich am sinnvollsten.

Als weiterer Faktor übt die Rammenergie einen wesentlichen Einfluss auf die Pegelwerte aus. Eine Energieverdoppelung erhöht den SEL um etwa 3,0 bis 4,5 dB (Wilke et al., 2012). Üblicherweise wird bei den vom BSH genehmigten Offshore-Rammungen derzeit die Rammenergie auf etwa 2.000 kJ begrenzt, auch wenn der Hydraulikhammer höhere Schlagenergien erzeugen könnte.

Bild 26 verdeutlicht den Einfluss des Pfahldurchmessers auf den SEL und L_{Peak} . Dargestellt sind die Ergebnisse von Hydroschallmessungen in einer Entfernung von 750 m zur Rammlokation bei verschiedenen Rammarbeiten aufgetragen über den Pfahldurchmesser.

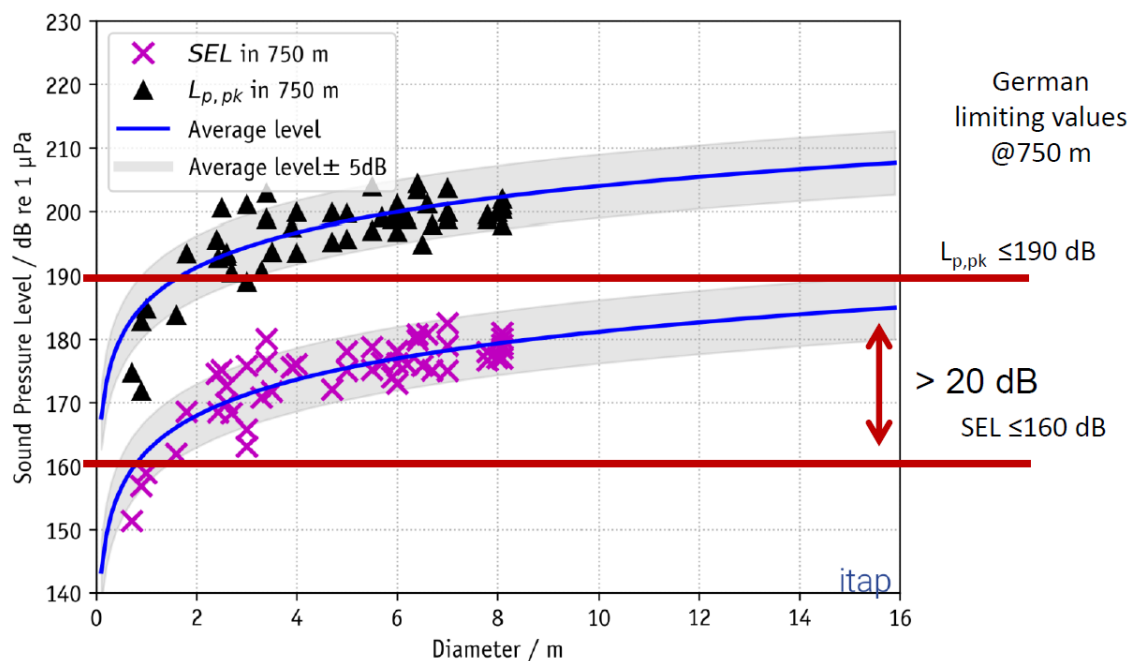


Bild 26: Einfluss des Pfahldurchmessers auf die ungeminderten Hydroschallpegel SEL und L_{Peak} (Bellmann et al., 2018)

Die Pegelwerte steigen mit wachsendem Pfahldurchmesser an. Der Effekt ist nicht linear. Die Bandbreite in diesem Diagramm beträgt etwa ± 5 dB und basiert auf der Streuung der vorhandenen Messergebnisse sowie weiterer Einflüsse wie z. B. der Rammenergie (Nehls et al., 2016). Das Bild zeigt zudem, dass bei den derzeitigen Pfahldurchmessern von 8 m mindestens 20 dB_{SEL} Schallminderung notwendig sind, um den Grenzwert von 160 dB verlässlich einzuhalten.

Die abstrahlende Oberfläche wirkt sich neben dem Pfahldurchmesser weiterhin auf die Pegelwerte aus. So lassen sich bei konischen Pfählen sowie unter Wasser gerammten Pin-Piles bei Tripod oder Jacket-Fundamenten sinkende Pegelwerte feststellen, da sich die abstrahlende Oberfläche kontinuierlich verkleinert.

Des Weiteren geht auch von der Kontaktfläche zwischen Hammer und Pfahl (Ausführung als geschraubte Flansch- oder Groutverbindung) bzw. die Dauer des Impulses ein Einfluss aus. Generell erzeugt eine größere Impulsdauer ein längeres Schallereignis und damit einen höheren SEL. Gleichzeitig führen kurze Kontaktzeiten zu deutlich höheren Peak-Werten.

Weitere Einflussfaktoren liegen in der Wassertiefe (vgl. untere Grenzfrequenz, spektrale Zusammensetzung des Schallereignisses), den Wetterbedingungen (raue oder glatte See bewirken unterschiedliche Streuung der Schallwellen), der Strömung, der Wandstärke und Länge des Pfahles (Steifigkeit, Eigenfrequenz), Bathymetrie sowie Schichtung des Wassers und Ausbildung von Schallkanälen (z. B. in der Ostsee). Die geologischen Verhältnisse mit eventuellen Schichten unterschiedlicher Steifigkeiten wirken sich zusätzlich indirekt in Hinblick auf Pfahldesign, Auswahl des Hammers sowie Rammenergie und direkt durch die Weiterleitung der Schallwellen in Form von Bodenwellen, einer Tunnellung von Schallminderungsmaßnahmen und der Rückstrahlung der Bodenwellen in das Meerwasser aus.

5 Auswirkung von Hydroschallemissionen auf marine Säuger

Die Lärmbelastung der Lebensräume der marinen Säuger und anderen Meereslebewesen ist ein großes Problem, da sie eine potenzielle Gefahr für diese Tiere darstellt. Der Einfluss, der während der Offshore-Bauarbeiten erzeugten Schallpegel auf die Meeressäuger, ist daher Gegenstand kontroverser Diskussionen und wird derzeit in zahlreichen Projekten erforscht. Die Untersuchungen beziehen sich dabei unter anderem auf die unter Naturschutz stehenden und stark gefährdeten Schweinswale (Bild 27). Diese Meeressäugetiere kommen regelmäßig in der Nord- und Ostsee vor und sind vom Aussterben bedroht.

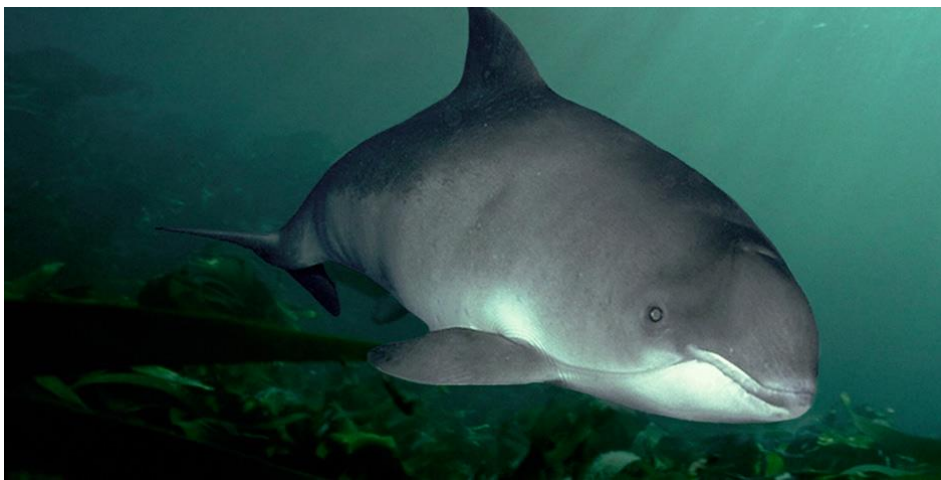


Bild 27: Schweinswal (WWF, 2016)

Die mit den Delfinen verwandten Schweinswale sind die einzige Walart Europas. Sie können bis zu 2 m groß werden und bewegen sich meist in seichten Küstengewässern. Die Sichtung von Schweinswalen in der Nord- und Ostsee ist zu allen Jahreszeiten möglich. Der Naturschutzbund *NABU* hat die Bestandszahlen der Schweinswale in der Nord- und Ostsee zusammengefasst (Tabelle 7):

Tabelle 7: Zahl der Schweinswale in der deutschen Nord- und Ostsee (NABU)

Deutsche Nordsee	Deutsche Ostsee
13.900 bis 51.600 Tiere	1.400 bis 2.900 Tiere
(Zählungen 2002 bis 2006)	(Zählungen 2003 – 2006)
(231.000 in der gesamten Nordsee; Stand: 2005)	(Ostseebestand: 15.500 westliche Population, < 600 östliche Population; Stand: 2005, bzw. 1995)

Unter Wasser sind die Schweinswale auf ihren akustischen Sinn angewiesen. Sie nutzen die hydroakustischen Signale, um mit den Artgenossen zu kommunizieren, Nahrung aufzusuchen, Feinde auszumachen, sich unter Wasser zu orientieren und Hindernisse zu vermeiden. Bei den ausgesandten hydroakustischen Signalen handelt es sich um sogenannte „Klicklaute“, die im hochfrequenten Bereich liegen. Diese werden an Objekten, wie möglichen Futterquellen oder Feinden, reflektiert. So entsteht ein Echo. Aus der Stärke des Echos und der Zeit bis sie das Echo wahrnehmen, können sie auf die Größe und Entfernung der Objekte schließen und sich damit ein akustisches Bild von ihrer Umgebung machen. Die während der Rammarbeiten verursachten Schallpegel können die zur Kommunikation und Orientierung erforderlichen Frequenzbereiche der Hörorgane stören und damit das Überleben der Meeressäuger gefährden.

Die Schallwirkung auf die Meeressäuger lässt sich in vier räumliche Kategorien unterteilen. Dabei erfolgt die Unterteilung in Abhängigkeit von dem mit der Entfernung von der Schallquelle abnehmenden Schalldruckpegel. Dabei gilt: Je größer die Entfernung von der Schallquelle, umso geringer ist die Gefahr einer Schädigung der Schweinswale. Bild 28 zeigt die vier Einwirkzonen einer Schallquelle (Thomson et al., 2006):

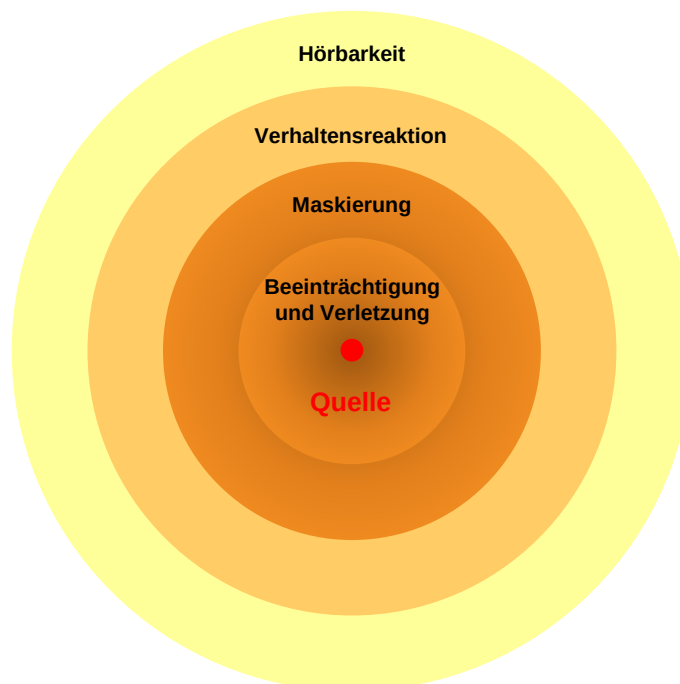


Bild 28: Schematische Darstellung schallinduzierter Effekte auf marine Säuger

Bei dem entferntesten Bereich um die Schallquelle handelt es sich um die Zone der Hörbarkeit. Sobald die freigesetzten Schallpegel die Hörschwelle der Schweinswale

erreichen, ist der Schall in diesem Bereich für sie hörbar. In der Zone der Reaktion können die steigenden Schallpegel die Tiere dazu veranlassen, ihr Verhalten zu ändern. Diese Verhaltensreaktion kann sich durch eine Änderung des Tauch-, Schwimm- oder aber des Atemverhaltens äußern. Die Tiere springen dann häufiger, schwimmen schneller als sonst und bewegen sich dabei deutlich von der Schallquelle weg. Dieses Meideverhalten spiegelt sich außerdem in der längeren Aufenthaltszeit an der Meeresoberfläche wider. Aufgrund der geringeren Schallintensität an der Meeresoberfläche halten sie sich hier länger auf als normalerweise. In der darauffolgenden Zone der Maskierung kann es zu einer Behinderung der akustischen Kommunikation der Schweinswale untereinander kommen. Dabei werden, wie bereits erwähnt, deren akustische Signale durch die Signale der Schallquelle überlagert. Unmittelbar an der Schallquelle, in der Zone der Schädigung, ist mit vorübergehenden Beeinträchtigungen oder sogar schweren Verletzungen (z.B. die physische Verletzung des Trommelfells oder der inneren Organe) der Tiere zu rechnen. Eine Beeinträchtigung der Tiere geht dabei zunächst durch eine vorübergehende Anhebung der Hörschwelle einher. Diese temporäre Hörschwellenverschiebung trägt die Bezeichnung „Temporary Threshold Shift (TTS)“ und führt zu einer zeitweiligen Schwerhörigkeit. Nach Ablauf eines bestimmten Zeitraumes ist das Hörvermögen wieder in der Lage sich zu erholen. Bei extrem hohen Schalldruckpegeln kann es sogar zu einer permanenten Hörschwellenverschiebung (Permanent Threshold Shift (PTS)) bis hin zum vollständigen Verlust des Hörvermögens kommen. Eine Erholung des Gehörs ist dann nicht mehr möglich.

Die größten Schallpegel, die während der Rammarbeiten gemessen werden, treten in einem Frequenzbereich zwischen 100 und 500 Hz auf (vgl. Bild 6 und Bild 25). In diesem Bereich liegt die Hörschwelle der Schweinswale bei rund 115 dB re 1 μ Pa (Bild 29). Damit liegen die Schallpegel, die während der Rammarbeiten gemessen werden, noch etwa 50 dB oberhalb der Hörschwelle der Schweinswale. Der gesamte Hörbereich der Tiere reicht von etwa 250 Hz bis zu 150 kHz, wobei das Gehör in einem Bereich zwischen 10 kHz und 100 kHz die größte Empfindlichkeit zeigt.

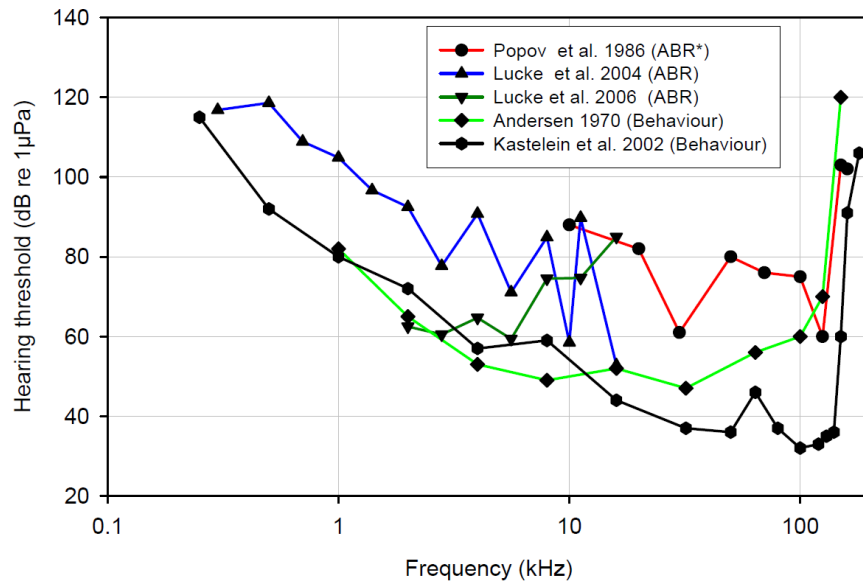


Bild 29: Hörschwelle eines Schweinswals (Auditory Brainstem Response (ABR)
(Thomson et al., 2006)

Das Auftreten einer temporären oder permanenten Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen wird durch die Pegelhöhe, die Einwirkdauer der Schallsignale, sowie die Zeitintervalle zwischen den Schallsignalen bestimmt. Eine Einwirkdauer von beispielsweise mehreren Stunden kann einen schwerwiegenden Schaden verursachen als ein einziger Rammschlag gleichen Schallpegels.

Es besteht folglich ein großer Forschungsbedarf bezüglich des Schädigungspotenzials der Hydroschallemissionen. Die bisherigen Erkenntnisse zeigen, dass mit den vom UBA festgelegten Lärmschutzwerten die zurzeit existierenden Schwellenwerte, ab denen mit einer Schädigung der Meeressäuger zu rechnen ist, nicht überschritten werden. Um diese Lärmschutzwerte einhalten zu können und damit die Meeressäuger zu schützen, ist die Kenntnis der Wellenausbreitungscharakteristik infolge der Rammarbeiten, sowie die Entwicklung neuartiger und Optimierung bestehender Schallminderungsmaßnahmen erforderlich.

6 Schallminderungsverfahren

Grundsätzlich existieren zwei Methoden, um Hydroschallemissionen während einer Pfahlrammung zu reduzieren. Die aktiven, primären Schallminderungsmaßnahmen verfolgen das Ziel, die Erregung zu beeinflussen und damit die Stärke der Schallquelle zu verringern und den Frequenzbereich zu verschieben. Hierzu zählen u. a. die Verlängerung der Schlagdauer, Einsatz von Sperrmassen (Koschinski et al., 2013), Einsatz größerer, schwerer Rammhämmer, aber auch die Entwicklung und Optimierung alternativer Installationsmethoden wie z. B. der Vibrationsrammung, dem Bohrverfahren oder schwimmenden Gründungen.

Bei sekundären, passiven Schallminderungsverfahren wird der Übertragungsweg der Schallmission in das Wasser oder die Ausbreitung der Schallwellen im Wasser beeinflusst. Dabei wurden Systeme wie der Große Blasenschleier (engl. Big Bubble Curtain, BBC), das IHC Schallminderungsrohr sowie der Hydro-Sound-Damper (HSD) zur Serienreife entwickelt, andere Systeme z. B. von AdBm (Wochner et al., 2014) befinden sich noch im Entwicklungs- und Erprobungsstadium. Grundsätzlich haben diese Schallminderungsverfahren gemein, die Schallübertragung durch einen Impedanzunterschied und damit einhergehende Reflexionen und Refraktionen der Wellen zu stören.

Die in dieser Arbeit behandelten Messungen beziehen sich auf den Einsatz des Blasenschleiers und des Hydro-Sound-Dampers. Aus diesem Grunde werden diese Systeme im Folgenden näher erläutert.

6.1 Blasenschleier

Ein Blasenschleier wird erzeugt, indem von Druckluft-Kompressoren erzeugte Luft durch einen auf dem Boden eines Gewässers verlegten Schlauch gepresst wird, wobei die Luft durch Öffnungen im Schlauch austritt und als Blasenschleier an die Wasseroberfläche steigt (Bild 30, links). Auf diese Weise entsteht aufgrund des künstlich erzeugten Impedanzsprunges über die gesamte Wassertiefe eine physikalisch-akustisch dämmende Barriere aus einem Wasser-Luft-Gemisch, die die Schallübertragung behindert. Dabei haben unter anderem das erzeugte Luftvolumen im Schlauch, der Durchmesser und Abstand, aber auch die Anzahl der Düsenöffnungen einen Einfluss auf den Wirkungsgrad der erzeugten physikalischen Barriere. Das physikalische Prinzip beruht im Wesentlichen auf der Änderung der hydroakustischen Eigenschaften des Wassers sowie auf den gleichzeitig auftretenden Streuungs- und Absorptionseffekten. Da der Blasenschleier

strömungsanfällig ist, wird er von einem separaten Schiff, das später mittels Kompressoren den Schlauch mit Druckluft speist, in Radien von ca. 80 m (abhängig von u. a. den Projektrandbedingungen sowie der Größe des Errichterschiffes) kreisförmig um den Pfahl entweder im Prelay-Verfahren (bevor das Installationsschiff die Rammlokation erreicht hat) oder im Postlay-Verfahren (nachdem das Installationsschiff die Rammlokation erreicht hat) ausgelegt (Bild 30, rechts).

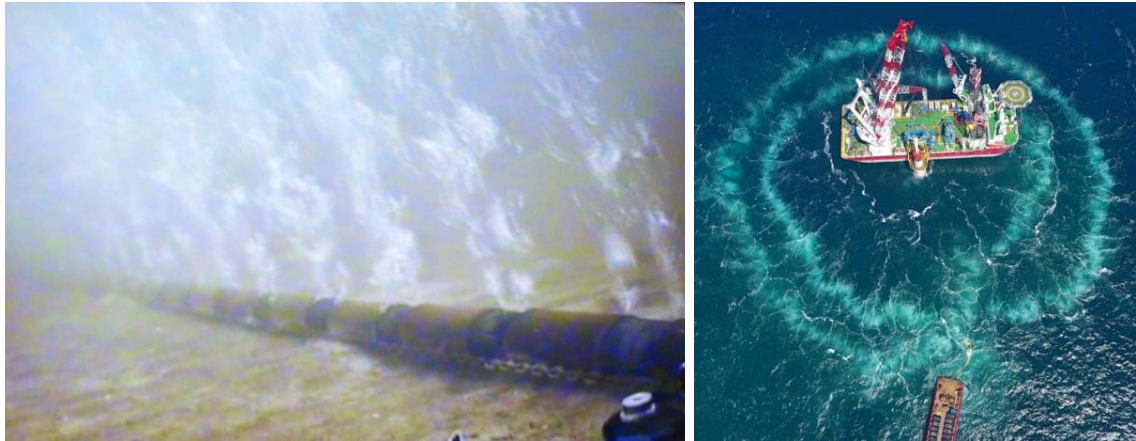


Bild 30: Blasenschleierschlauch (Ø 10 cm) auf dem Meeresgrund (links), doppelter Großer Blasenschleier bei den Gründungsarbeiten für den Windpark Veja Mate (2016) (rechts)
(Hydrotechnik Lübeck, 2016)

Mit Luftblasen angereichertes Wasser wird kompressibel und reagiert wie ein inhomogenes, absorbierendes Medium. Wie in Bild 30 links zu erkennen, steigen die Luftblasen unkontrolliert, räumlich auf, d. h. der Blasenschleier wird mit wachsendem Abstand zum Meeresboden breiter.

Das Dämpfungsvermögen der schwingenden Luftblase im Wasser wird direkt von dem Blasendurchmesser, folglich der Resonanzfrequenz bestimmt. Sie lässt sich nach Minnaert (1933) ermitteln zu:

$$f_{R,Luftblase} = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{3\gamma P_A}{\rho_A}} \quad (6.1)$$

r	Radius der Luftblase [m]
γ	1,4 für Luft (Verhältnis der spezifischen Wärmekapazität)
P_A	Wasserdruck ($10^5 \times (1 + 0,1Z)$) [N/m ²]
Z	Wassertiefe [m]
ρ_A	Dichte des Wassers ($1,03 \times 10^3$ kg/m ³)

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge sind in Bild 31 Resonanzfrequenzen einer Luftblase im Wasser nach Gleichung 6.1 über den Blasendurchmesser und die Wassertiefe aufgetragen. Blau schraffiert ist jeweils der Frequenzbereich mit den größten

Lärmbelastungen aus der Terzanalyse eines Rammimpulses (Bild 25). Im linken Diagramm repräsentieren die Kurvenverläufe den Einfluss der Wassertiefe, im rechten des Blasendurchmessers.

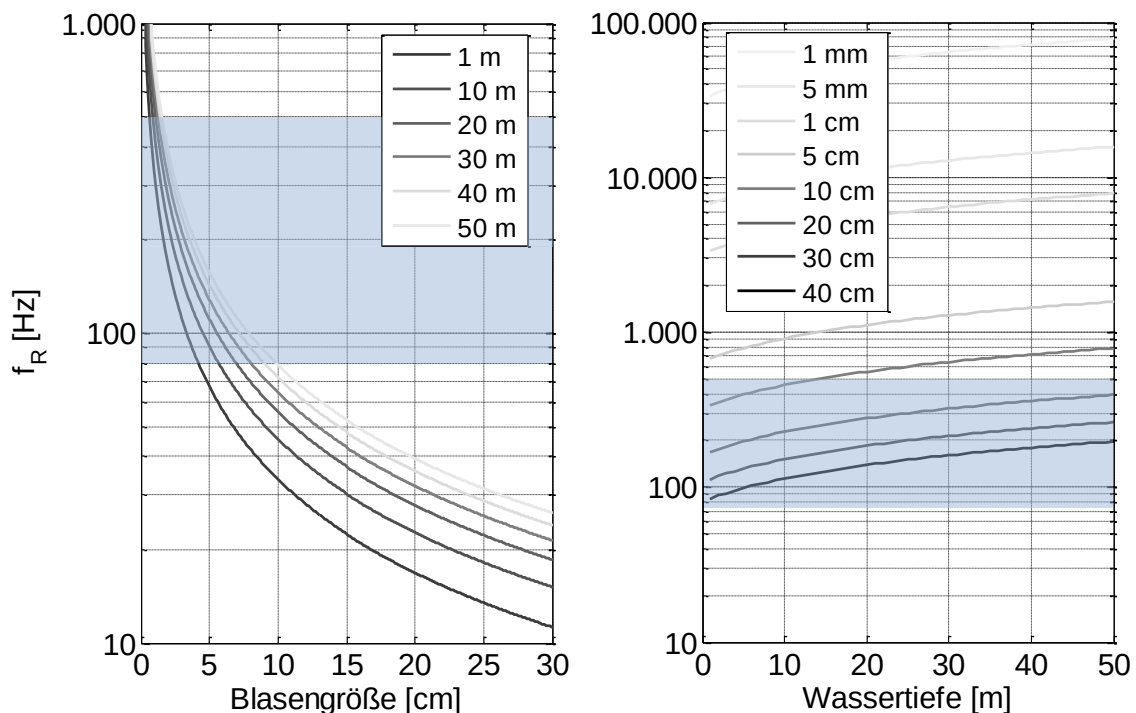


Bild 31: Resonanzfrequenz einer Luftblase im Wasser – links: f_R über die Blasengröße, rechts: f_R über die Wassertiefe

Grundsätzlich besitzen kleine Blasendurchmesser eine höhere Resonanzfrequenz als größere. Weitere Faktoren sind die Wassertiefe und damit der hydrostatische Druck sowie das Auftriebsverhalten. Die Größe der einzelnen Luftblase hat zudem einen entscheidenden Einfluss auf die Aufstiegsgeschwindigkeit der Bläschen (Bild 32). Diese Komponenten bewirken ein sehr komplexes Zusammenspiel auf die Resonanzfrequenz, das im Folgenden erläutert wird.

Die am Meeresboden unter Druck aus dem Schlauch austretenden Luftblasen steigen mit einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 0,3 m/s auf (Griesmann et al., 2009). Der Blasendurchmesser ist in diesem Moment sehr klein (wenige zehntel Millimeter). Die Blasen steigen infolge der Auftriebskraft auf, der Durchmesser nimmt aufgrund des sinkenden hydrostatischen Druckes zu. Die Resonanzfrequenz ändert sich somit und wird kleiner. Sobald der Durchmesser jedoch auf einen Wert von 1 cm bis 3 cm angestiegen ist, teilt sich die Luftblase aufgrund von Instabilitäten und zerfällt wieder in kleinere. Die Grenze lässt sich nicht konkret angeben, da hierbei weitere Faktoren wie Strömung,

Salzgehalt, Abstand, Form usw. Einfluss nehmen. Die Resonanzfrequenz steigt folglich wieder an. Dieser Prozess findet fortwährend wiederholend statt und bewirkt, dass der Wasserkörper größtenteils von kleinen Luftblasen angereichert ist. Große Luftblasen ($> 3 \text{ cm}$) sind im Wasser nicht vorhanden. Das Verhalten ist allgemein sehr chaotisch und nicht kontrollierbar.

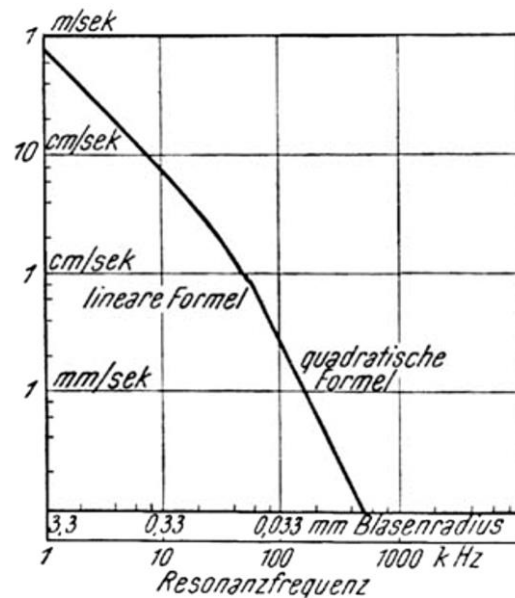


Bild 32: Aufstiegs geschwindigkeit von Luftblasen in Abhängigkeit des Blasenradius
(Griesmann et al., 2009)

In der Vergangenheit wurde deshalb die Schallminderungswirkung verschiedener Konfigurationen des Blasenschleiers untersucht (Bellmann et al., 2015). Es kamen einfache sowie mehrfache Blasenschleier zum Einsatz, darüber hinaus wurde die Luftmenge variiert. Die Ergebnisse wurden u. a. von (Bellmann et al., 2018) veröffentlicht und sind auszugsweise in Tabelle 8 aufgeführt. Mit einem einfachen Blasenschleier sind bei Wassertiefen bis 25 m Schallminderungen bis zu 15 dB SEL erzielt worden, mit einem doppelten Blasenschleier etwa 3 dB mehr. Mit steigender Wassertiefe reduziert sich die Schallminderung.

Tabelle 8: Schallminderungswirkung verschiedener Blaseschleierkonfigurationen (Auszug aus Bellmann et al., 2018)

Schallminderungssystem	Schallminderung ΔSEL [dB]
Single Big Bubble Curtain – BBC ($> 0,3 \text{ m}^3/(\text{min} * \text{m})$, Wassertiefe $< 25 \text{ m}$)	$11 \leq 14 \leq 15$
Double Big Bubble Curtain – DBBC ($> 0,3 \text{ m}^3/(\text{min} * \text{m})$, Wassertiefe $< 25 \text{ m}$)	$14 \leq 17 \leq 18$
Double Big Bubble Curtain – DBBC ($> 0,3 \text{ m}^3/(\text{min} * \text{m})$, Wassertiefe $\approx 40 \text{ m}$)	$8 \leq 11 \leq 13$

Der Wirkungsbereich eines Blaseschleiers im Terzspektrum geht aus Bild 33 und Bild 34 hervor. Dargestellt ist zum einen ein Referenzspektrum (schwarze Linie) ohne Schallminderungssystem und zum anderen ein typisches Spektrum bei Einsatz des Blaseschleiers (blaue Linie). Die Bereiche, in denen die Kurvenverläufe Differenzen aufweisen, markieren den Wirkungsbereich des Blaseschleiers.

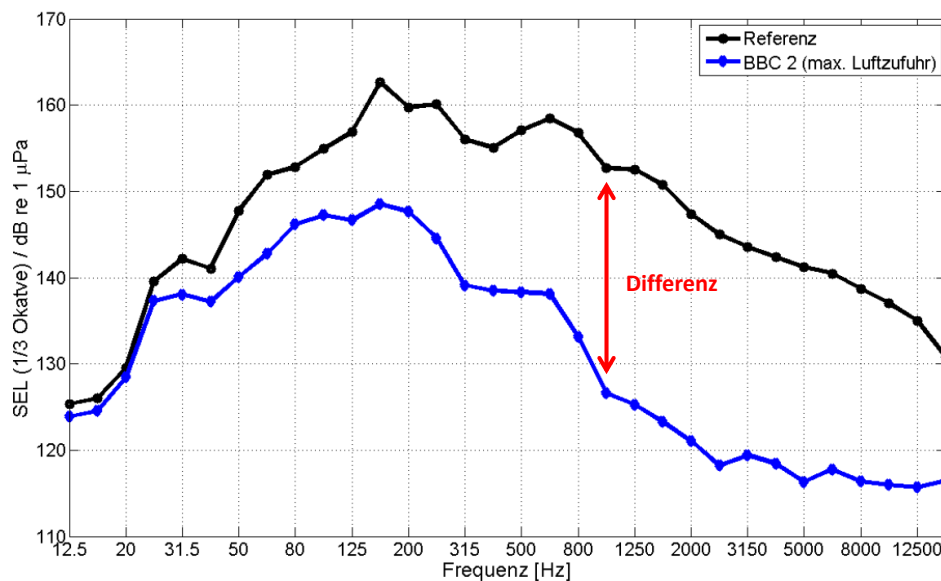


Bild 33: Terzspektrale Einzelereignispegel einer Referenz (ohne Schallminderungssystem) und einer BBC-Konfiguration unter ähnlichen Randbedingungen im Abstand von 750 m zur Rammlokalisation bei ca. 30 m Wassertiefe (Diederichs et al., 2014)

Für die Beurteilung von Schallminderungssystemen hat sich die Darstellung der Terzanalysen in Form von Differenzspektrale bewährt (Bild 34).

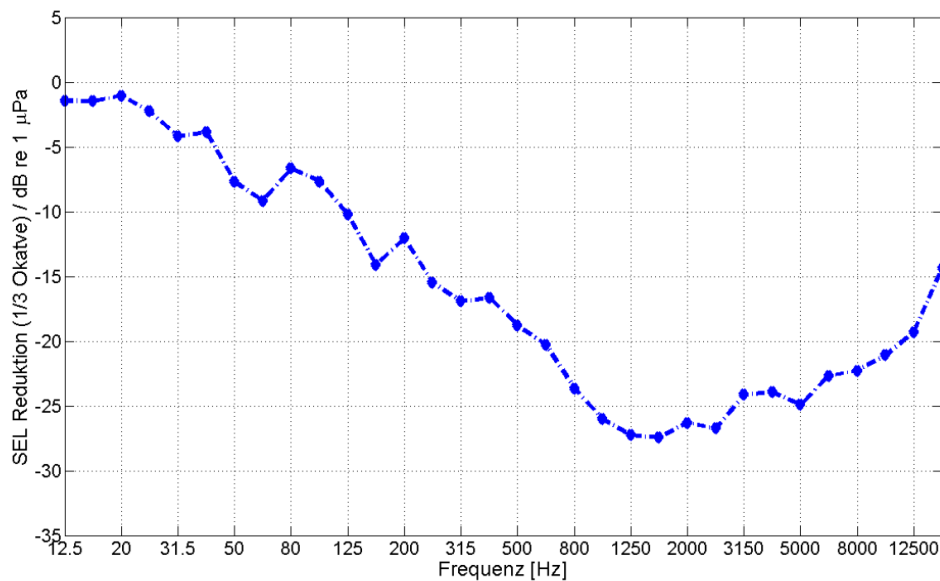


Bild 34: Differenzspektrum zu Bild 33 (Differenz zwischen Terzspektrum aus Referenz und BBC 2) (Diederichs et al., 2014)

Dabei wird für jede Terzfrequenz die Differenz zwischen Referenz und Schallminderungssystem gebildet. Negative Werte im Differenzspektrum bedeuten eine Reduktion des Hydroschalls bei dieser Frequenz. Es ergibt sich für die vorliegende BBC-Konfiguration eine Schallminderung von 0 dB bis 10 dB im Frequenzbereich 31,5 Hz bis 100 Hz. Im Bereich des höchsten Energieeintrages von 100 Hz bis 400 Hz steigt die Schallminderung auf Werte von 10 dB bis 15 dB. Zu höheren Frequenzen nimmt die Minderung weiter auf Werte von über 25 dB zu und fällt bei Frequenzen > 5.000 Hz auf unter 15 dB. Dieser Verlauf hat sich als typisches Ergebnis für Blasenschleier herausgestellt.

Die Korrelation dieses Ergebnisses mit der Abhängigkeit zwischen Blasengröße und Resonanzfrequenz aus Bild 31 (links) stützt die Aussage, dass im Wesentlichen Luftblasen mit kleinem Durchmesser im Wasser vorhanden sind.

6.2 Hydro-Sound-Damper

Für eine effektive Schallminderung im schallintensiven Bereich oberhalb von 80 Hz sind nach Gleichung 6.1 Luftblasen mit einem Durchmesser von mehr als 10 cm notwendig. Diese sind jedoch aufgrund der beschriebenen physikalischen Effekte der freien aufsteigenden Luftblase im Wasser (vgl. Kap. 6.1) nicht möglich, so dass die Entwicklung weiterer Schallminderungssysteme notwendig ist. Ebenso ist ein effizienter Einsatz aufgrund des chaotischen Verhaltens der einzelnen Blasen hinsichtlich Resonanzfrequenz, Anzahl, Form, Position und Abstand im Blasenschleier nicht kontrolliert umsetzbar.

Zur Lösung dieses Problems wurde von (Elmer et al., 2011) der Hydro-Sound-Damper (HSD) entwickelt, bei dem luftgefüllte Hüllkörper aus dünnem, elastischem Material als künstliche Luftblasen zur Schallminderung im Wasser eingesetzt werden. Die in Größe und Materialeigenschaften unterschiedlichen Hüllkörper sind an durchströmbaren Fischernetzen befestigt, die wiederum den Rammpfahl im Wasser umgeben (Bild 35). Bei dem HSD-System handelt es sich um ein sogenanntes Nahfeldsystem, da die Hüllkörper bzw. das Netz im Gegensatz zum Blasenschleier unmittelbar an der Pfahlwandung angeordnet sind und zu diesem je nach Strömung Kontakt haben.

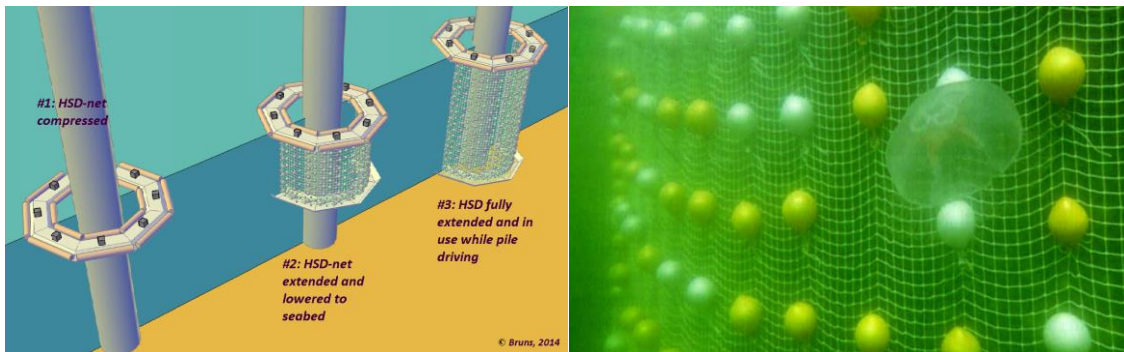


Bild 35: Prinzipskizze HSD an einem Monopile (links), Unterwasseraufnahme eines aufgespannten HSD-Netzes beim ESRa-Test (© Kunte, rechts) (Bruns, 2013)

Das Wirkungsprinzip ist ähnlich dem des Blasenschleiers und damit einer schwingenden Luftblase im Wasser, so dass die Formel 6.1 erweitert um die Membransteifigkeit S in erster Näherung zur Ermittlung der Resonanzfrequenz von einzelnen HSD-Elementen Anwendung findet (Elmer et al., 2011):

$$f_{R,HSD} = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{3\gamma P_H + S}{\rho_A}} \quad (6.2)$$

r	Radius der Luftblase [m]
γ	1,4 für Luft (Verhältnis der spezifischen Wärmekapazität)
p_H	individueller Innendruck der Membranhülle [N/m ²]
S	Membransteifigkeit der Hülle
Z	Wassertiefe [m]
ρ_A	Dichte des Wassers ($1,03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

Der HSD ist im Vergleich zum Blasenschleier noch sehr jung. Ein erster Einsatz unter Testbedingungen wurde beim ESra-Test 2011 durchgeführt (Wilke et al., 2012). In der Folge wurde der HSD im Rahmen eines Forschungsvorhabens (FKZ: 0325365) an der TU Braunschweig untersucht und zur Serienreife entwickelt (Stahlmann et al., 2015). In diesem Zusammenhang wurden umfangreiche Laboruntersuchungen zum Dämpfungs- und Auftriebsverhalten von HSD-Elementen durchgeführt und veröffentlicht (Bruns et al., 2012), (Bruns, 2014). Darüber hinaus wurde ein optimiertes System 2012 in einem Offshore-Test erfolgreich während einer Monopileinstallation beim Windpark 'London Array' bei einer Wassertiefe von ca. 20 m eingesetzt (Bruns et al., 2013). Bild 36 zeigt die Ergebnisse der Messungen während des Einsatzes. Der Pfahldurchmesser der Monopiles beträgt 5,7 m und als Rammhammer wurde ein IHC S-1400 eingesetzt.

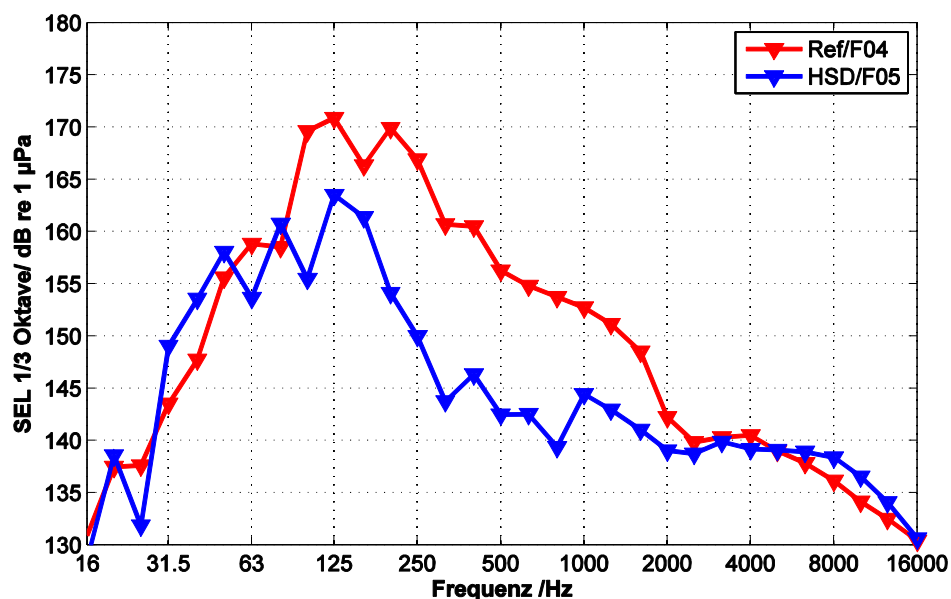


Bild 36: Terzspektren des Einzelereignispegels einer Referenz und des HSD-Systems beim Windpark 'London Array' im Abstand von 750 m zur Rammlokation (Remmers et al., 2015)

In diesem Versuch wurde die Referenzmessung an Pfahl F04 ermittelt und der Messung bei Einsatz des HSD-Systems an Pfahl F05 gegenübergestellt. Der Bereich des höchsten Energieeintrages liegt bei diesem Versuch zwischen 100 Hz und 250 Hz. Das

Differenzspektrum in Bild 37 zeigt eine wesentliche Schallminderung von 10 dB bis 20 dB im Bereich zwischen 80 Hz und 1.000 Hz.

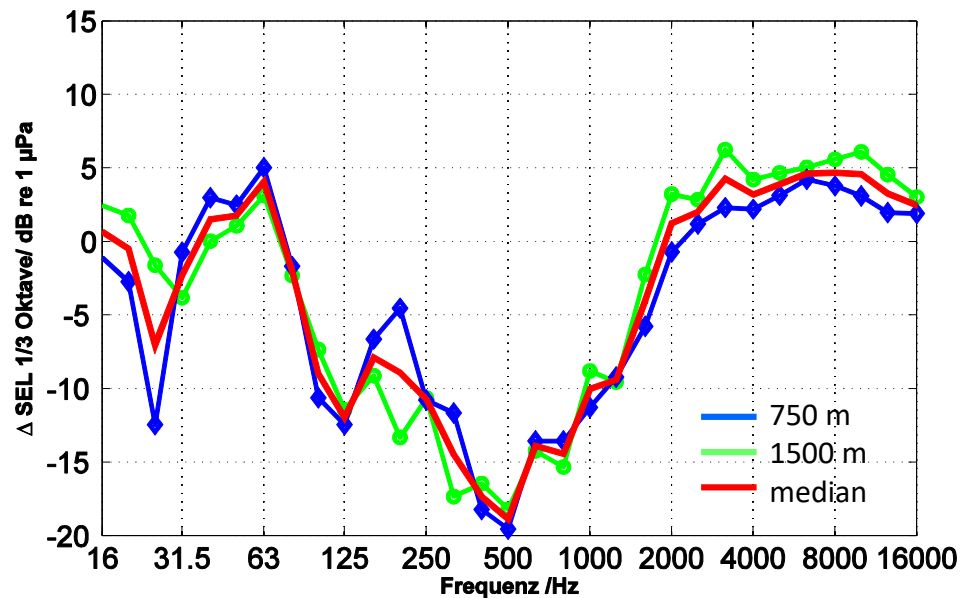


Bild 37: Differenzspektrum beim HSD-Test beim Windpark 'London Array'
(Remmers et al., 2015)

Mit dem HSD-System konnte beim ESRa-Test (Wilke et al., 2012) eine Schallminderung von bis zu $\Delta\text{SEL}_{750\text{ m}}$ 6 dB und beim London Array Einsatz (Stahlmann et al., 2015) von bis zu 13 dB erzeugt werden.

7 Feldmessungen beim Offshore-Windpark 'Amrumbank West'

Um weitere Informationen über die Schallabstrahlung und Wellenausbreitung zu gewinnen, wurden während der Gründungsarbeiten für den OWP *Amrumbank West*, bei denen zum ersten Mal die Kombination der Schallminderungsverfahren Großer Blasen-schleier und Hydro-Sound-Damper eingesetzt wurden, umfangreiche Messkampagnen zur Untersuchung der Schallabstrahlung und -ausbreitung in den unterschiedlichen Medien Pfahl, Wasser und Boden durchgeführt.

7.1 OWP 'Amrumbank West'

Der OWP *Amrumbank West* mit 80 OWEA und einer Gesamtleistung von 288 MW wurde in den Jahren 2014 und 2015 ca. 35 km nördlich der Insel Helgoland und ca. 40 km westlich der Insel Amrum von der *E.ON Kraftwerke GmbH* in der deutschen Nordsee errichtet. Die Position und das Parklayout sind in Bild 38 dargestellt.

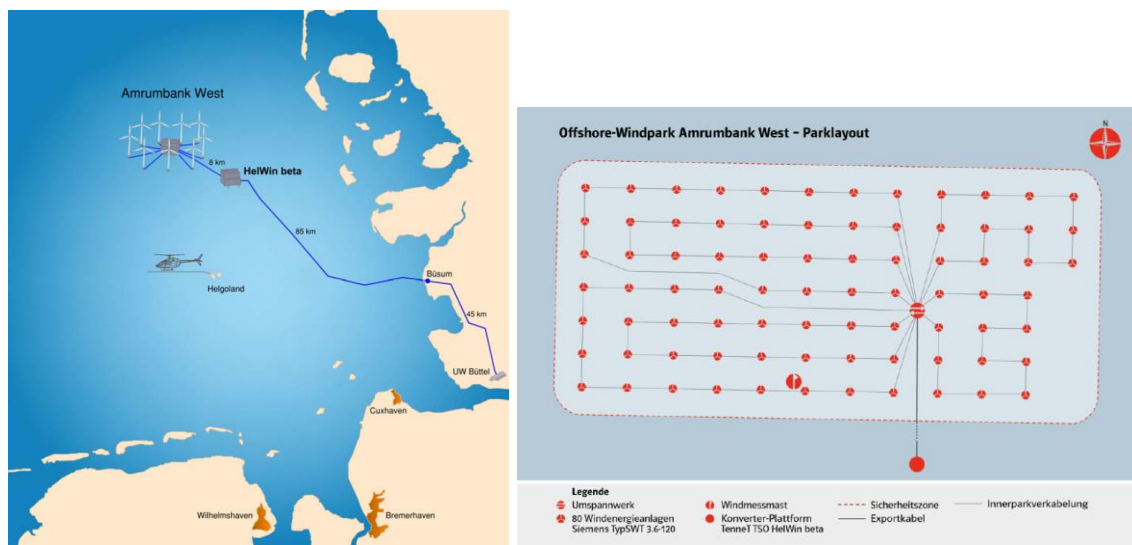


Bild 38: Projektgebiet und Parklayout vom OWP 'Amrumbank West' (Selinger, 2011)

Die Gründung der Anlagen erfolgte mittels Monopiles mit Längen von etwa 55 m und einem Durchmesser von 6 m, die im oberen Bereich konisch auf 5,2 m zulaufen. Jeder Monopile besteht dabei herstellungsbedingt aus mehreren im Mittel 2 m breiten, kreisförmigen Ringen, die zusammengeschweißt wurden und als Ganzes den Monopile ergeben. Die Wassertiefen variieren standortabhängig zwischen 19 m bis 24 m (Selinger,

2011). Die Installation der Monopiles und das Aufsetzen der Transition Pieces mit Ringflanschverbindung erfolgte von dem Jackup Errichterschiff *MPI Discovery*.



Bild 39: *MPI Discovery* während der Installationsarbeiten

Der Baugrund ist wie größtenteils in der Nordsee homogen aufgebaut. Unter einer etwa 1 m mächtigen holozänen marinen Deckschicht, bestehen die für die Gründung relevanten Schichten fast ausschließlich aus mitteldicht bis sehr dicht gelagerten pleistozänen Sanden. Diese Fein- und Mittelsande beinhalten z. T. schluffige oder kiesige Anteile und sind mit bindigen und kiesigen Horizonten geringer Mächtigkeit durchzogen.

Sowohl die Wassertiefen als auch die geologischen Bedingungen im Projektgebiet sind als sehr gleichmäßig zu bewerten, was sich insbesondere positiv auf die Übertragbarkeit der Messungen bei verschiedenen Installationsstandorten auswirkt.

Die Rammung der Pfähle wurde mit einem Hydrohammer vom Typ MHU 1900S der Fa. *Menck GmbH* durchgeführt. Dieser hatte mit einer Gesamthöhe von 22 m ein Gesamtgewicht von ca. 200 t. Die maximale Rammenergie des Hammers liegt bei 1.900 kJ. Zur Führung und Stabilisierung der Monopiles zu Beginn der Rammung wurde ein direkt am Heck des Installationsschiffes positionierter Pilegripper eingesetzt.

7.2 Schallminderungskonzept

Das Schallminderungskonzept für die Installation von Gründungen für OWEA ist in mehrere Schritte unterteilt. Den Rammarbeiten geht gemäß BSH (Müller et al., 2011) zunächst die Vergrämung der Meeressäuger voraus. Dafür werden unter Wasser Pinger mit geringer akustischer Reichweite von 200 m bis 300 m eingesetzt, um die Tiere vorzuwarnen und aus dem unmittelbaren Installationsbereich zu verscheuchen. Anschließend erfolgt die Vergrämung mittels Sealscarer mit größerem Wirkungsradius von 2 km bei Frequenzen zwischen 12 kHz bis 16 kHz und Lärmpegeln von 190 dB. Der Vergrämungszeitraum mit Pinger und Sealscarer ist vom BSH mit 60 Minuten vorgeschrieben. Zum Ende des Vergrämungszeitraumes sind parallel die Schallminderungssysteme zu aktivieren. Die Rammung beginnt mit einem sogenannten etwa 10-minütigen Softstart (vgl. Bild 55). Das bedeutet, dass in diesem Zeitraum nur Einzelschläge mit geringer Energie ausgeführt werden. Im Anschluss erfolgt die Rammung mit höheren Energien und Schlagfrequenzen von bis zu 40 Schlägen pro Minute. Durch diese Vorgehensweise soll gewährleistet werden, dass sich die Meeressäuger aus der Schädigungszone entfernen.

Zur Minderung des Unterwasserschalls wurden die beiden voneinander unabhängigen Schallminderungssysteme Großer Blasenschleier in unterschiedlichen Konfigurationen (einfach, doppelt und dreifach) und der Hydro-Sound-Damper verwendet (Bild 40). Dabei wurde der HSD direkt am Pfahl von Bord des Errichterschiffes eingesetzt, der Große Blasenschleier wurde mit einem Radius von etwa 100 m um das Errichterschiff herum von einem separaten Schiff verlegt und betrieben. Aus baubetrieblichen Gründen konnte das HSD-System nicht über die gesamte Rammung, sondern erst nach Erreichen einer eigenständigen Standfestigkeit des Monopiles über diesen gehoben und abgelassen werden. Es ergab sich daher aus Sicht des Schallschutzes ein zweigeteilter Installationsprozess (vgl. Bild 55). In Phase 1 erfolgte die Rammung mit verminderter Energie, sodass der BBC allein für eine ausreichende Schallminderung zur Einhaltung der Grenzwerte des Unterwasserschalls sorgen sollte. Bei einer Einbindung von etwa 12 m wurde in Phase 2 zusätzlich das HSD-System eingesetzt, sodass mit höherer Energie zur Überwindung des größer werdenden Bodenwiderstandes geschlagen werden konnte.

Da der Blasenschleier erfahrungsgemäß aufgrund der nicht kontrollierbaren, kleinen Luftblasengröße seine größte Dämpfungswirkung bei höheren Frequenzen besitzt, wurde das Netz des HSD mit dem Fokus auf die Schallminderung bei tiefen Frequenzen ausgelegt.

Die im Rahmen des Baumonitoring notwendigen Hydroschallmessungen zur Bestimmung der Pegelwerte in 750 m Entfernung zur Rammlokation wurden vom *Institut für Technische und Angewandte Physik GmbH (itap)* bei jeder Pfahlrammung durchgeführt.

7.3 Messkonzept

Das Ziel des Messkonzeptes bestand darin, die Schallausbreitung ganzheitlich auf den Übertragungswegen Pfahl, Wasser und Boden beschreiben und nachvollziehen zu können. Darüber hinaus sollte es Informationen zur Wirksamkeit der Schallminderungssysteme liefern. Des Weiteren erfolgte die Planung und Ausführung der Messungen unter Berücksichtigung der vom Errichterschiff vorgegebenen Möglichkeiten und Randbedingungen.

Um Informationen zur Schallabstrahlung zu erhalten, wurden an drei ausgewählte Monopiles Dehnungsmesstreifen in axialer und tangentialer Messrichtung sowie Beschleunigungssensoren in axialer und radialer Messrichtung appliziert. Die Sensoren wurden in verschiedenen Messachsen und Messquerschnitten (MQ) verteilt über die Pfahlänge und den -querschnitt angeordnet (Bild 41, Tabelle 9). Die eingezeichnete GOK markiert den Zustand zum Ende der Rammung.

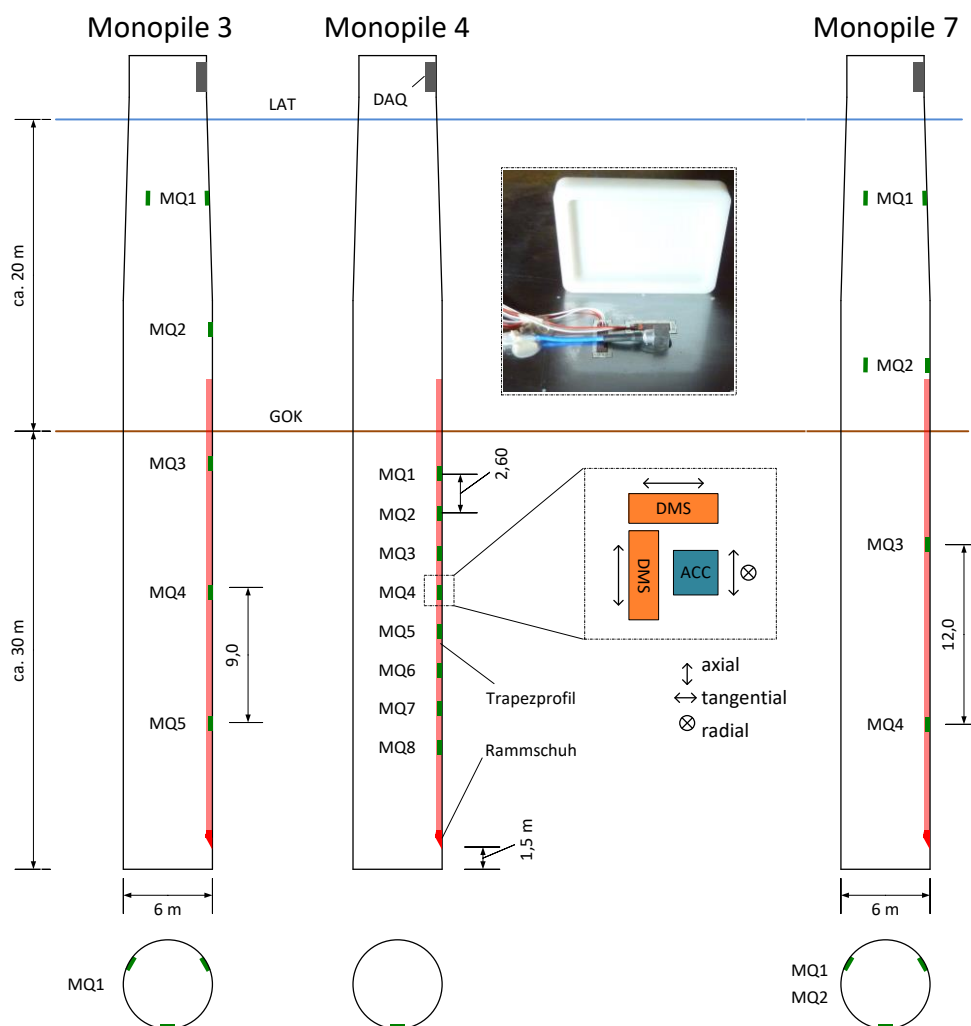


Bild 41: Messkonfigurationen bei den drei mit Sensorik bestückten Monopiles

Tabelle 9: Positionen der Messquerschnitte

	Monopile 3	Monopile 4	Monopile 7
	Distanz zu OK Pfahl [m]	Distanz zu OK Pfahl [m]	Distanz zu OK Pfahl [m]
MQ 1	9,6	28,15	9,25
MQ 2	18,45	30,75	21,00
MQ 3	27,50	33,35	33,00
MQ 4	36,15	35,95	45,00
MQ 5	45,00	38,55	
MQ 6		41,15	
MQ 7		43,75	
MQ 8		46,35	
UK Monopile	54,80	55,45	54,75

Für die Untersuchung des Hydroschalls und der Bodenschwingung wurde eine dichte Matrix an Messpunkten angestrebt, um sowohl die Schallausbreitung im Wasser über die Wassersäule als auch über die Entfernung zur Schallquelle aussagekräftig zu ermitteln. Das unterste Hydrophon wurde jeweils 1 m, das oberste 17 m über dem Meeresboden angeordnet (Bild 42). Zu jeder Hydroschallmessposition wurde zusätzlich ein triaxial messendes Geophon zur Erfassung der Bodenschwingungen ausgebracht. Durch diese nah beieinanderliegende Anordnung von Geophon und Hydrophon soll eine Korrelation der Interaktion der Schallwellen im Boden und Wasser untersucht werden.

Die ausgewählten Messlokationen im Umkreis der zu installierenden Pfähle lassen sich logistisch in einen Nahbereich und einen Fernbereich einteilen. Nicht zu verwechseln sind diese Bereiche mit dem akustischen Nah- und Fernfeld. Im Nahbereich wurden die Sensoren an fünf Messlokationen vom Errichtungsschiff und damit innerhalb des Blasenschleiers abgesetzt, die kabelgebunden von einer zentralen Datenerfassung (DAQ) zeitsynchron gemessen und aufgezeichnet wurden. Die zeitsynchrone Messung ist insbesondere für die Ermittlung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten erforderlich. Außerhalb des Blasenschleiers wurden in Entfernungen von 150 m bis 1500 m an drei weiteren Messlokationen autarke Geophone mit einzelnen Hydrophonen von Bord eines separaten Schiffes ausgesetzt. Bild 42 zeigt in einem Längsschnitt die Positionen der Messlokationen im Nah- und Fernbereich. Die Bezeichnung der Messlokationen (ML) entspricht dabei der Entfernung zum Monopile in Metern.

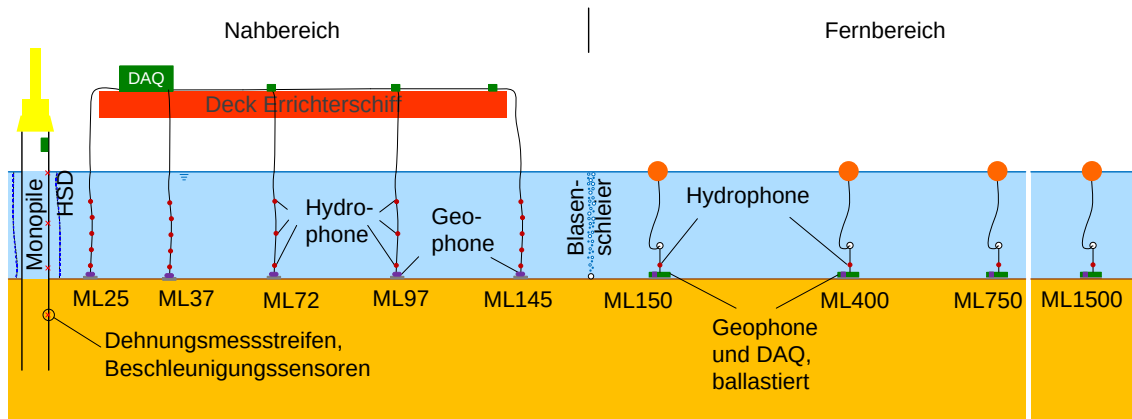


Bild 42: Messkonzept im Längsschnitt mit Anordnung der Sensorik am Pfahl sowie im Wasser und am Meeresboden, eingeteilt in Nah- und Fernbereich

Die Messlokationen im Fernbereich wurden bei den einzelnen Pfählen aus Gründen maritimer Sicherheitsauflagen und in Abhängigkeit von Wind-, Wellen- und Strömungsrichtung variiert. Aufgrund der elliptischen Form des Großen Blasenschleiers um das Errichtungsschiff konnten Messbojen außerhalb des Blasenschleiers in etwa in gleicher Entfernung (ML150) wie die äußerste Messlokation innerhalb des Blasenschleiers (ML145), sowie darüber hinaus ausgebracht werden (Bild 43).

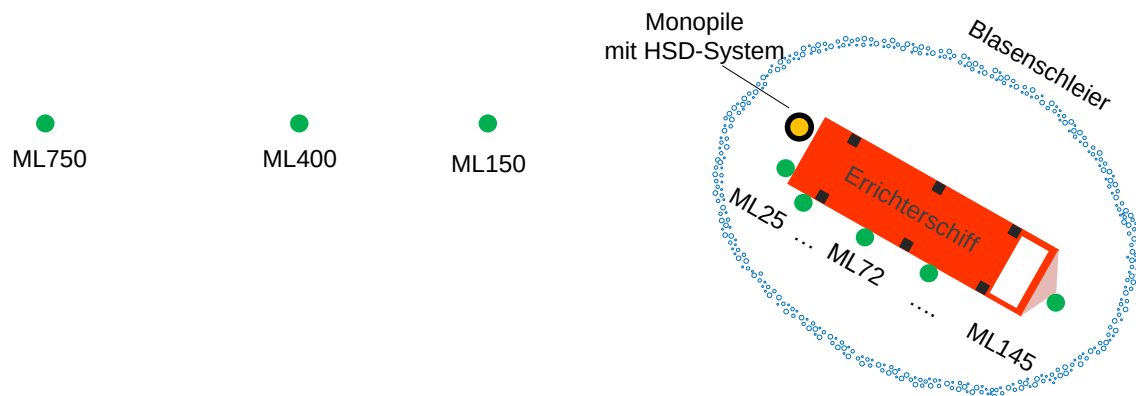


Bild 43: Überblick der Messlokationen in Nahbereich (innerhalb des Blasenschleiers) und Fernbereich (außerhalb des Blasenschleiers)

7.4 Messkampagnen

Während drei Messkampagnen wurden die Installationen von insgesamt acht Monopiles messtechnisch begleitet. Dabei kamen verschiedene Schallminderungskonfigurationen zum Einsatz, die eine Bewertung der Wirksamkeit der unterschiedlichen Schallminderungssysteme ermöglichen. An drei Pfählen wurden Referenzmessungen entsprechend der Messvorschrift des BSH zur Evaluation der Schallminderung der eingesetzten Schallminderungssysteme durchgeführt. Eine Übersicht über die im Rahmen der Messkampagnen eingesetzten Schallminderungssysteme sowie dazugehörige Messungen und Messpositionen gibt Tabelle 10.

Tabelle 10: Übersicht der Messpositionen während der Monopileinstallationen

Mono- pile	Schallminde- rungs- system	Messlokationen, Distanz zum Pfahl [m]		Pfahl- messungen
		Nahbereich	Fernbereich*	
1	DBBC + BBC + HSD	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(1),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	ML500 ^(G) ML800 ^(G) ML1500	--
2	BBC + HSD	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(1),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	ML250 ^(G) ML800 ^(G) ML1500	--
3	DBBC + BBC + HSD	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(1),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	ML250 ^(G) ML750 ^(G) ML1500	ja
4	BBC + HSD	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(2),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	ML150 ^(G) ML300	ja
5	BBC + HSD	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(2),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	Keine	--
6	BBC	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(2),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	ML150 ^(G) ML400 ^(G) ML750	--
7	ohne (Referenz)	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(2),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	ML150 ^(G) ML400 ^(G) ML750	ja
8	HSD	ML25 ^{(1),(G)} , ML37 ^{(2),(G)} , ML72 ^{(2),(G)} , ML97 ^{(2),(G)} , ML145 ^{(1),(G)}	ML150 ^(G) ML400 ^(G) ML750	--

⁽¹⁾ Abstand der Hydrophone zum Meeresboden 1 m, 5 m, 9 m, 13 m, 17 m

⁽²⁾ Abstand der Hydrophone zum Meeresboden 1 m, 9 m, 17 m

^(G) Messlokationen, an denen zusätzlich ein Geophon ausgebracht wurden

* Abstand der Hydrophone zum Meeresboden im Fernbereich 1 m

7.5 Messtechnische Instrumentierung

Die Planung der Messpositionen und Durchführung sämtlicher Messungen geschah stets in enger Abstimmung mit der Crew des Errichterschiffs. Da die Nahbereichsmessungen zeitsynchron und von einer zentralen Datenerfassungseinheit durchgeführt wurden, wurden aus Zeit- und Sicherheitsgründen vor Beginn der ersten Messkampagne die Mess- und Datenkabel dauerhaft auf dem Deck des Errichterschiffes verlegt und nach Beendigung wieder demontiert. Bild 44 zeigt die Anordnung der Messlokationen und Kabelverlegung an Deck der *MPI Discovery*.

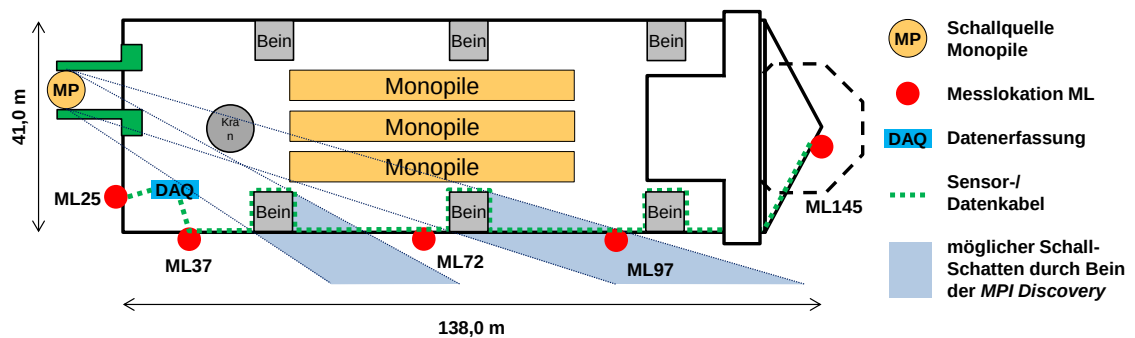


Bild 44: Anordnung der Messlokationen im Nahbereich an Deck der *MPI Discovery*

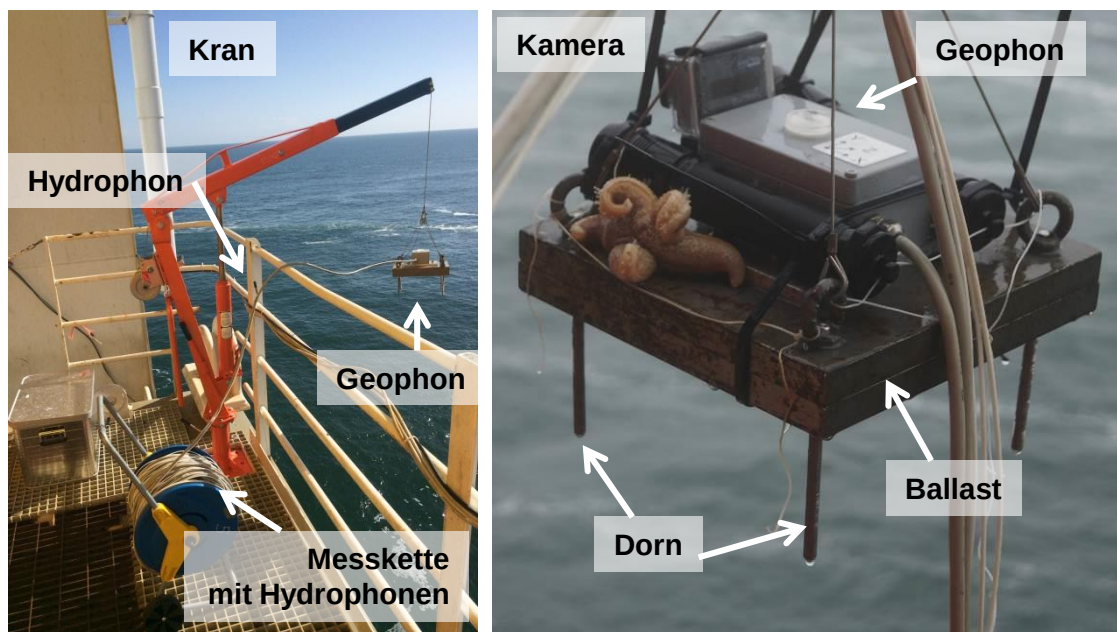


Bild 45: Kran zum Absetzen der Geophone und Hydrophone (links), Geophone mit Ballastierung, Dornen und Kamera (rechts)

Die Sensorik wurde mittels Hilfskränen (Bild 45, links) über die Bordkante auf dem Meeresboden abgesetzt. Es wurden triaxiale Geophone eingesetzt, die die Schwinggeschwindigkeit des Sedimentes in den drei Raumrichtungen erfasst haben. Für eine gute Ankopplung wurden die Geophone mit einem Ballast von 20 kg beschwert. Um die Verschiebung der Geophone infolge Strömung zu verhindern, wurden zusätzlich in den Eckpunkten Dorne angeordnet (Bild 45, rechts), die sich in den Meeresboden gedrückt haben. Die weitestgehende Lagestabilität über den Zeitraum der Rammung wurde durch Auswertung der Aufnahmen der Kamera nachgewiesen (Bild 46).



Bild 46: Meeresboden im Bereich des Geophons an ML37

Am Kabel des Geophons wurden in den vorgesehenen Tiefen die Hydrophone befestigt und zeitgleich zu den Geophonen ausgebracht. Die Hydrophone und Geophone wurden anschließend mit der zentralen Datenerfassung verbunden und die Messungen gestartet (Bild 47).



Bild 47: Messequipment an den einzelnen ML (links), Datenerfassung (rechts)

Die Spezifikationen der im Nahbereich eingesetzten Sensorik ist Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Spezifikation der Messtechnik im Nahbereich

	Geophon	Hydrophon
Messlokation	ML25 ... ML145	ML25 ... ML145
Hersteller Sensor	Walesch	Brüel & Kjær
Typ	MST-1031	8103
Frequenzbereich	2 ... 160 Hz	0,1 Hz ... 20 kHz
Messbereich	100 mm/s	
Hersteller Datenerfassung	National Instruments	Brüel & Kjær
Modul	SCXI-1300	LAN-XI mit Nexus Verstärker
Software	LabView	Pulse
Auflösung	16 bit	24 bit
Samplingfrequenz	10.000 kHz	65.536 Hz

Im Fernbereich kam eine kombinierte autarke Datenerfassung von Hydrophon und Geophon zum Einsatz (Bild 48). Diese Systeme wurden mit einem separat gecharterten Messschiff ausgebracht, das der Einhaltung geforderter maritimer Sicherheitsauflagen sowie dem Handling der Messsysteme genüge.

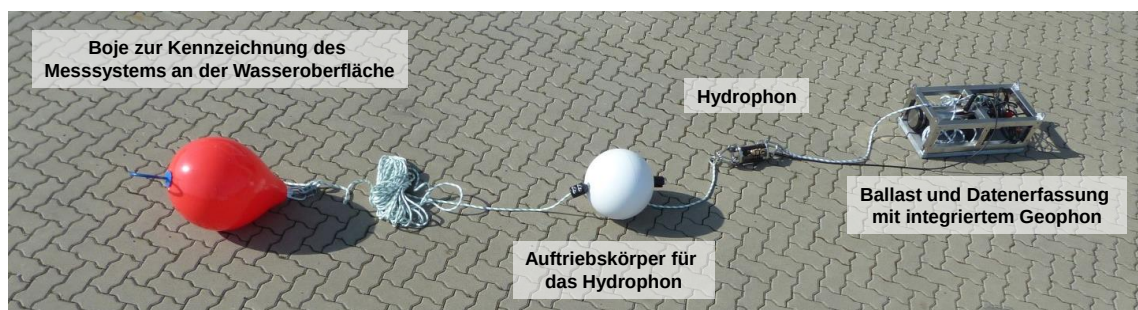


Bild 48: kombinierte autarke Datenerfassung von Hydrophon und Geophon im Fernbereich

Aus Gründen der Verfügbarkeit kamen während der Messkampagne eins das Messschiff *Reykjanes* und während der Messkampagnen zwei und drei die *Arne Tilesius* zum Einsatz.

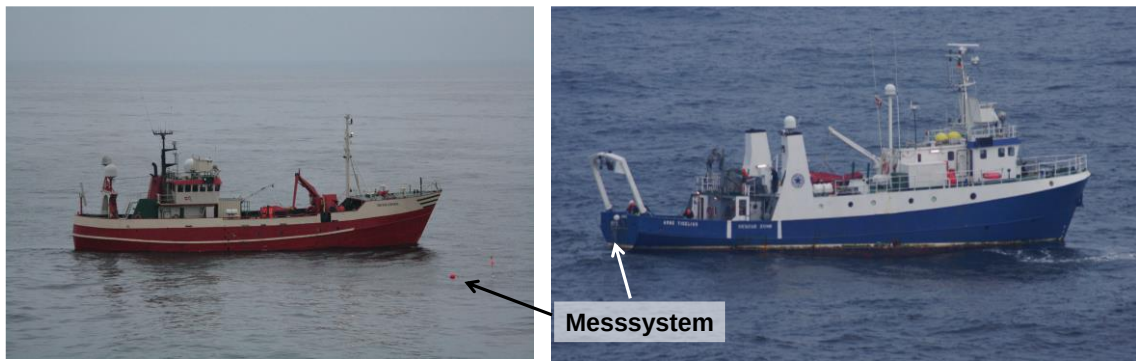


Bild 49: Messschiffe Reykjanes (links) und Arne Tiselius (rechts) während der Messkampagnen

Die Spezifikationen der im Fernbereich eingesetzten Sensorik ist Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Spezifikation der Messtechnik im Fernbereich

	Geophon	Hydrophon
Messlokation	ML150 ... ML1500	ML150 ... ML1500
Hersteller Sensor	I/O Sensor	Reson
Typ	SM-6 (B coil)	TC4037
Frequenzbereich	1 Hz ... 10 kHz	1 Hz ... 50 kHz
Hersteller Datenerfassung	develogic	develogic
Modul	OBS.Vault	Sono.Vault
Auflösung	32 bit	16 bit
Samplingfrequenz	2.000 Hz	48.000 Hz

Eine große Herausforderung bei der Applikation der Sensorik in den drei Monopiles bestand in den Vorgaben, aufgrund des HSD-Netzes an der Außenwandung alles auf der Innenseite des Pfahls zu instrumentieren sowie keine spanenden und thermischen Verfahren bei der Montage zu verwenden. Aufgrund der Position der Sensorik im Pfahlinneren war es zudem nicht möglich, Sensorkabel nach außen zu führen und die Datenerfassung an Deck des Errichterschiffes zu positionieren. Diese machte die Konzeptionierung einer autarken, automatisiert hochfrequent messenden Datenerfassung notwendig, die über einen Zeitraum von mindestens 12 Stunden messen und speichern konnte und zudem den hohen Beschleunigungen von bis zu 1.000 g infolge der Rammschläge Stand hielt.

Sämtliche Verbindungen zur Anbringung und Kapselung der Sensoren sowie zum Schutz der Kabelverbindungen und Aufhängung der Datenerfassung wurden daraufhin

mit einem speziell für diese Zwecke ausgewählten Klebstoff durchgeführt (Wisner et al., 2015) (Bild 50, Bild 51).

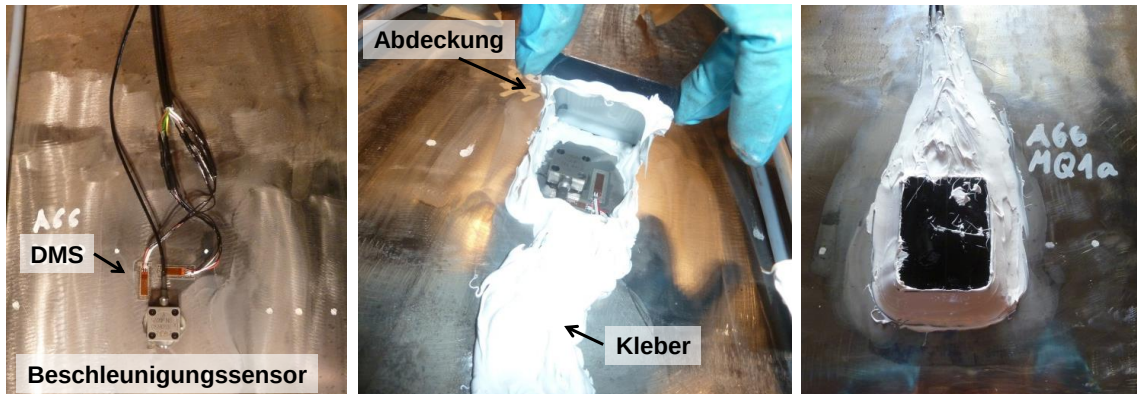


Bild 50: applizierte DMS und Beschleunigungssensor (links), Abdeckung und Kleber (Mitte), gekapselte Sensoren (rechts)



Bild 51: Rammschuh (links), Kabelbündel und Schutzprofil (Mitte), Zugentlastung und Aufhängung der Datenerfassung (rechts)

Die restriktiven Anforderungen an die Datenerfassungseinheit ließen keine handelsübliche Lösung zu, sondern bedurfte einer Eigenentwicklung. Sie bestand aus einer etwa 40 kg schweren Einhausung, in der der Messcomputer inkl. dreier Erweiterungsmodule und Stromversorgung installiert waren (Bild 52, links).

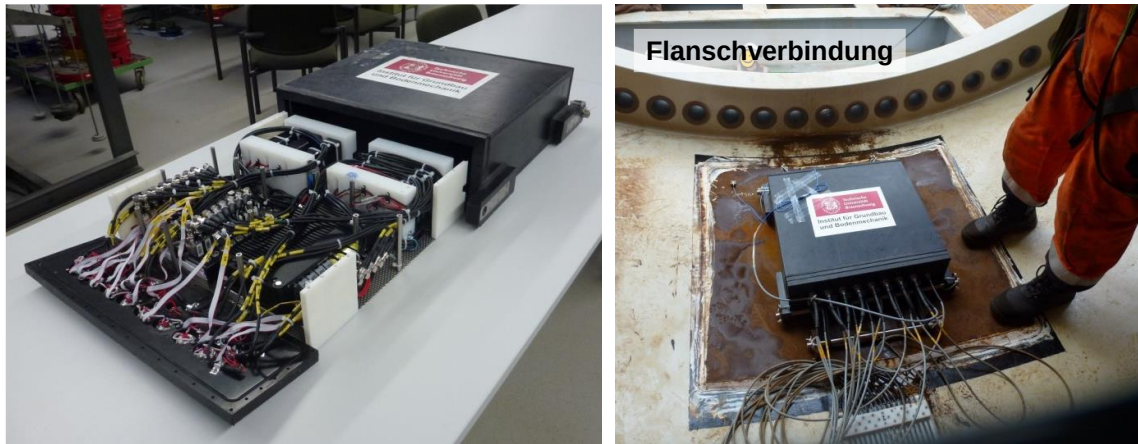


Bild 52: Datenerfassung im Labor (links) und im Monopile kurz vor der Rammung (rechts)

Diese wurde an einer am Pfahlkopf im Inneren angeklebten Trägerplatte elastisch aufgehängt (Bild 52, rechts). Mit der Datenerfassung war es möglich, bis zu 32 Kanäle mit jeweils 20 kHz zeitsynchron aufzuzeichnen.

Die Spezifikationen der am Pfahl eingesetzten Sensorik sind Tabelle 13 zu entnehmen.

Tabelle 13: Spezifikation der Messtechnik am Pfahl

Sensor	Hersteller	Typ	Spezifikation
Beschleunigungssensor uniaxial	PCB	350B50	$\pm 5.000 \text{ g}$, 0,4 ... 10.000 Hz
Beschleunigungssensor triaxial	PCB	350B04	$\pm 10.000 \text{ g}$, 3 ... 10.000 Hz
Dehnungsmessstreifen	Vishay	LWK	350 Ohm, $k = 2$
Hersteller Datenerfassung	DEWESoft	DEWE43	20 kHz, 24 bit

7.6 CTD-Sonden-Messung

Entsprechend der Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen (Müller et al., 2011) ist für die Beurteilung von Hydroschallmessungen vorab die Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils im Wasser mittels einer CTD-Sonde (Conductivity, Temperature, Depth (dt. Leitfähigkeit, Temperatur und Wassertiefe)) notwendig.

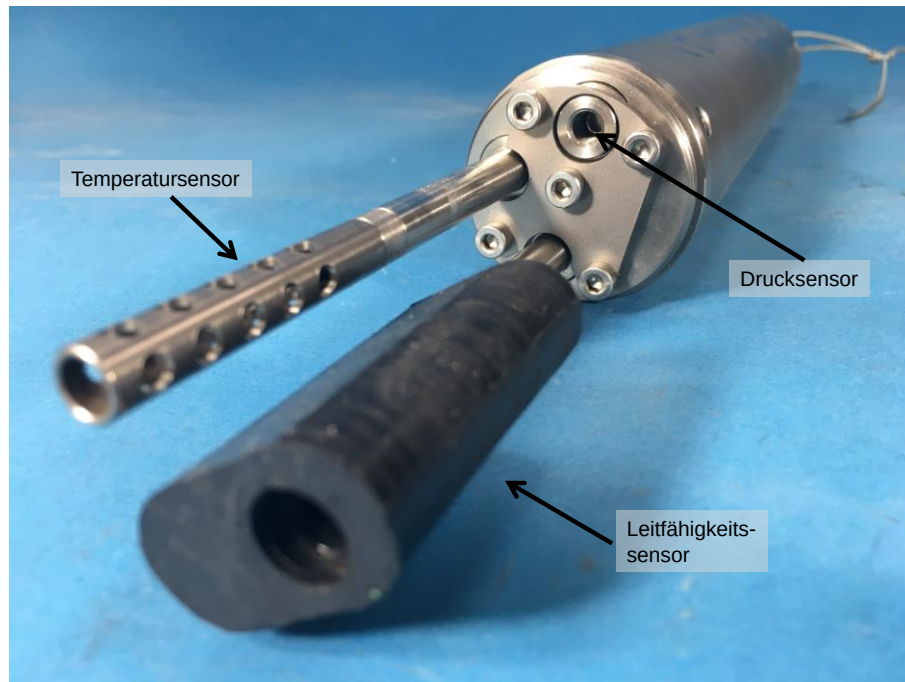


Bild 53: Sensoren der eingesetzten CTD-Sonde

Für die Ermittlung der einzelnen Parameter besitzt die Sonde verschiedene Sensoren (Bild 53). Die Temperatur wird direkt mit einem PT100-Widerstandsfühler und die Wassertiefe direkt mit einem Drucksensor ermittelt. Der Salzgehalt sowie die Schallgeschwindigkeit des Wassers werden indirekt über den Leitfähigkeitssensor bestimmt. Die Berechnung erfolgt entsprechend der UNESCO-Formel (UNESCO, 1981) über die drei ermittelten Größen Druck, Temperatur und Leitfähigkeit.

Die Messungen während der drei durchgeführten Messkampagnen wurden mit einer Sonde vom Typ CTD48M der Fa. Sea and Sun Technology GmbH durchgeführt. Bild 54 zeigt die Messergebnisse getrennt nach den Messgrößen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, Temperatur sowie Salzgehalt. Die Werte waren erwartungsgemäß bei den jeweiligen Messkampagnen über die Wassertiefe konstant, was auf eine gute Durchmischung des Wasserkörpers aufgrund der Gezeitenwechsel zurückzuführen ist.

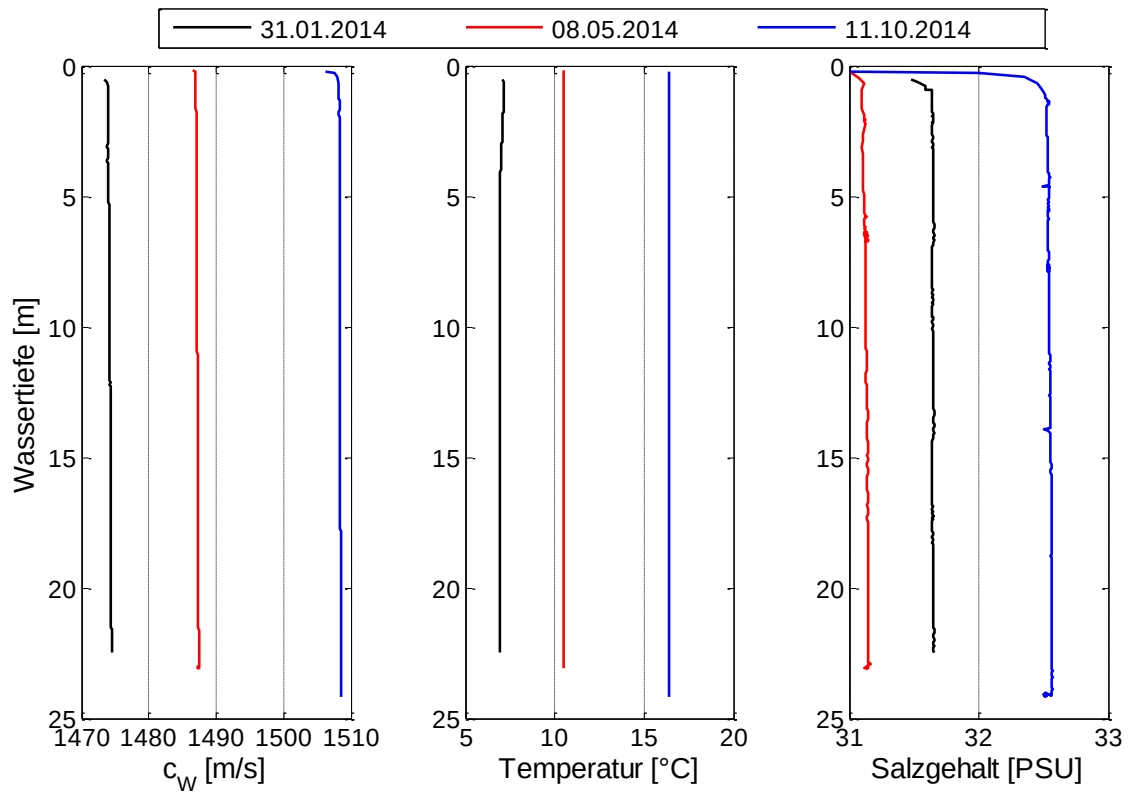


Bild 54: Ergebnisse der CTD-Sondenmessungen während der drei Messkampagnen
(links: c_w , Mitte: Temperatur, rechts: Salzgehalt, über die Wassertiefe)

Die Wassertemperatur betrug in der ersten Jahreshälfte 7 bzw. 10 °C bei einem Salzgehalt von etwa 31,5 PSU und einer Wellengeschwindigkeit des Wassers von $c_w = 1475 - 1488$ m/s. Bei der im Oktober 2014 durchgeführten Messung lagen die Werte mit einer Wassertemperatur von 16°C und c_w von 1509 m/s etwas höher.

8 Auswertung und Interpretation der Messungen

8.1 Datenaufbereitung und –auswertung

Die im Zuge jeder Pfahlinstallation erhobenen Messdaten belegen mehrere Gigabyte an Speicherplatz. Sämtliche im Folgenden beschriebenen Auswertungen wurden mit dem Softwareprogramm *Matlab* durchgeführt. Aufgrund der großen Datenmengen war es für die Auswertung notwendig, Skripte zu entwickeln, die die digitale Signalverarbeitung automatisiert ausgeführt haben. Bild 55 zeigt exemplarisch die Daten der Pfahlinstallation von Pfahl 4 (BBC+HSD) aufgezeichnet von jeweils einem Sensor am Pfahl (Beschleunigung), im Wasser (Schalldruck) und am Meeresboden (Schwinggeschwindigkeit).

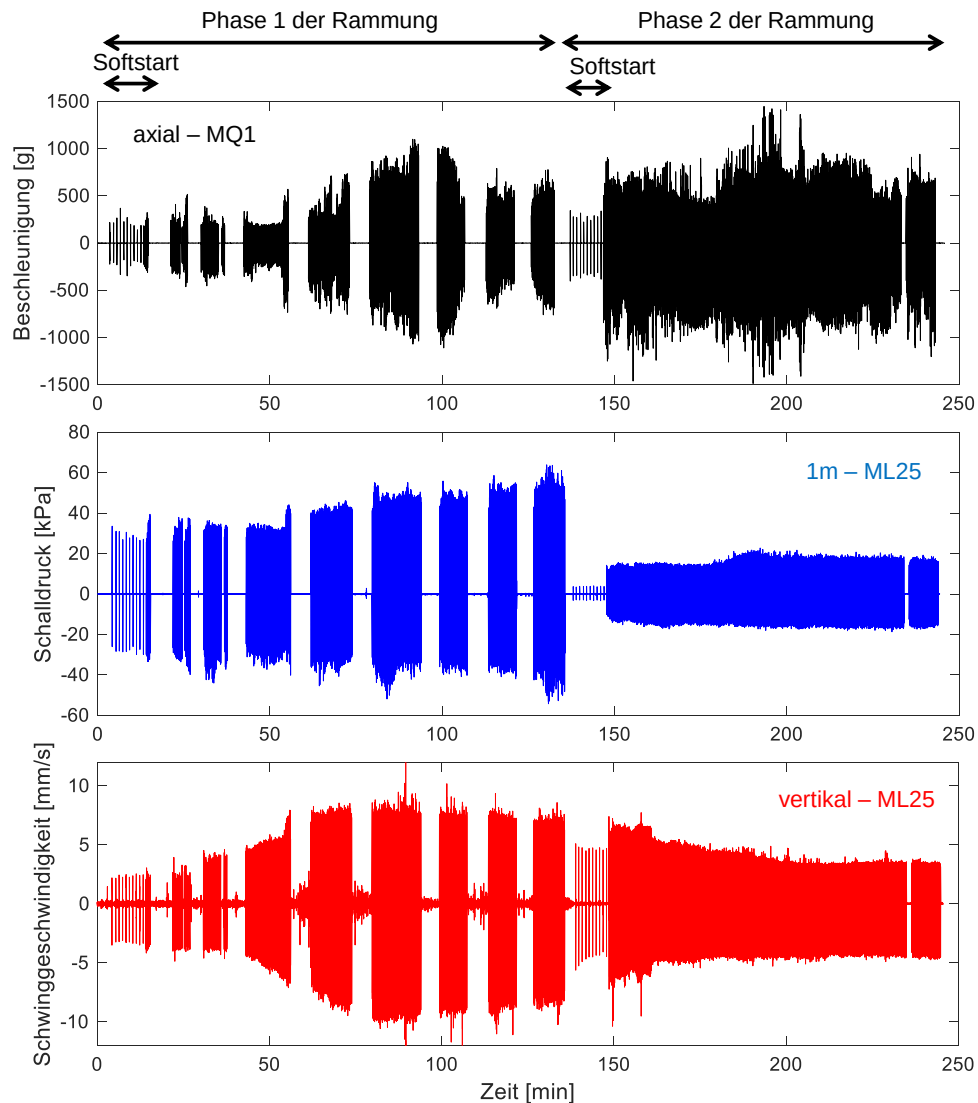


Bild 55: erhobene Messdaten bei der Pfahlinstallation von Pfahl 4 jeweils eines Sensors am Pfahl (oben), im Wasser (Mitte) und am Meeresboden (unten)

Wie bereits erläutert, ist die Pfahlinstallation in zwei Phasen unterteilt (vgl. Kap. 7.2). Im Bild ist die Zeitdauer zwischen Phase 1 und 2 zur Installation des HSD-Systems ausgeschnitten. Insbesondere beim Rammbeginn mit dem Softstart sind die einzelnen Rammschläge sehr gut visuell zu erkennen, während der darauffolgenden Rammserien mit etwa 40 Rammschlägen pro Minute ist dies nur in der Detailansicht möglich. Insgesamt wurden bei den untersuchten Installationen jeweils zwischen 3.000 und 8.000 Rammschläge benötigt, um die Pfähle auf Sollniveau abzusetzen. Darüber hinaus wird in Phase 2 die Wirkung des HSD durch die Reduktion der Schalldruckamplitude im Wasser (mittleres Diagramm) ersichtlich.

Zur Beschreibung der Vorgänge während der Pfahlrammung wurde aus sämtlichen Datensätzen automatisiert für jeden Sensor jeder Rammschlag extrahiert und weiterhin analysiert. Es wurden die relevanten Größen wie Maximal- und Minimalwerte ermittelt und Frequenzanalysen durchgeführt. Darüber hinaus wurden zur Bewertung der Schallminderungssysteme die relevanten Pegelwerte SEL und L_{Peak} sowie in Terzanalysen die frequenzabhängigen Pegel ermittelt. Die Zusammenstellung der in jedem Medium Pfahl, Wasser und Meeresbodenoberfläche separat ermittelten Ergebnisse lässt in sich die Beschreibung der Mechanismen innerhalb eines Mediums zu. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Medien veranschaulicht die Interaktion untereinander.

Die Komplexität des Messprogramms mit der Analyse und Interpretation der Messdaten zeigt sich darin, dass in der Literatur für jedes Medium ein Analyseprocedere existiert, dass dieses jedoch speziell für ein konkretes Beurteilungsziel entwickelt wurden. Für die Pfahldynamik ist das z. B. die Ermittlung von Tragfähigkeiten, beim Hydroschall die Ermittlung einer Lärmbelastung und bei der Bodendynamik die Ermittlung von Erschütterungsereignissen und deren Auswirkung auf Gebäude und Menschen. Die Beurteilung der Interaktion dieser drei Medien untereinander mit einer derartig großen Datenbasis ist bisher nicht erfolgt.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Ergebnisse separat für jedes Ausbreitungsmedium (Pfahldynamik, Hydroakustik und Bodendynamik) betrachtet. Anschließend werden durch Gegenüberstellungen von Ergebnissen unterschiedlicher Medien die Interaktionen dieser tiefergehend analysiert.

8.2 Rammprotokoll

Während jeder Pfahlinstallation werden die während der Rammung relevanten Daten in Form von Rammprotokollen vom Betreiber des Hammers in diesem Fall der *Fa. Menck GmbH* dokumentiert. Diese enthalten u. a. die zur Auswertung wichtigen Informationen zur kinetischen Energie jedes Rammschlages sowie die aufsummierte Anzahl der notwendigen Rammschläge je 25 cm Pfahleindringung (Bild 56). Diese Werte können als Maß für die in den Pfahl eingetragene Energie bzw. den Bodenwiderstand herangezogen werden.

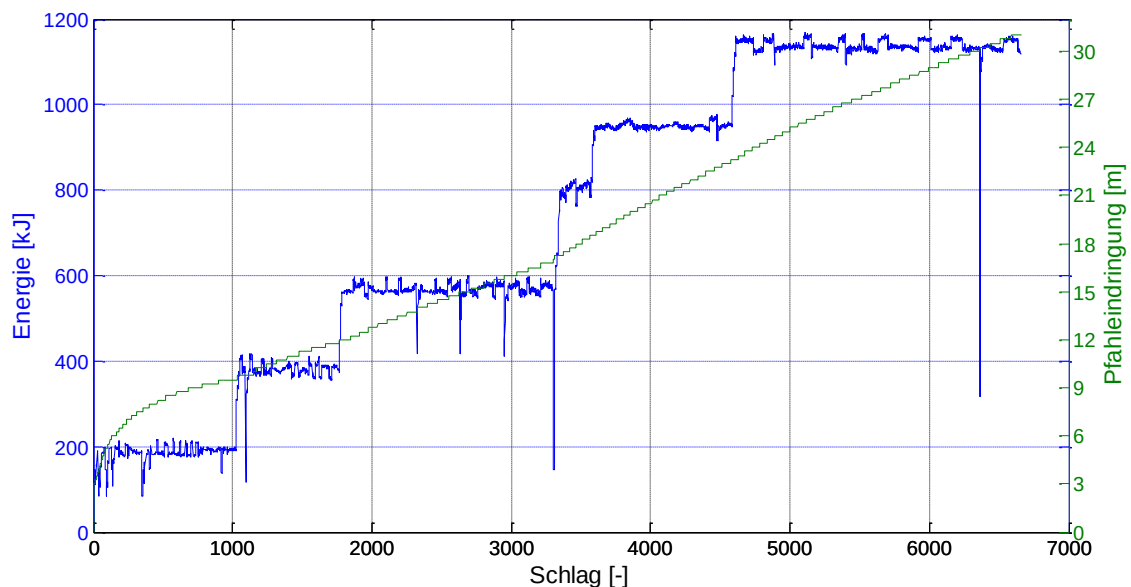


Bild 56: Rammenergie (blau) und Pfahleindringung (grün) über den Verlauf der Rammung von Pfahl 4

Um einen gleichmäßigen Rammfortschritt zu erreichen, wurde die Rammenergie mit fortschreitender Einbindung sukzessive erhöht. Es zeigen sich verschiedene Energieniveaus von ca. 200 kJ, 400 kJ, 570 kJ, 950 kJ und 1140 kJ. Zur Begrenzung der Hydro-schallemissionen wurde beim OWP *Amrumbank West* die zulässige Rammenergie auf 1140 kJ begrenzt. Die Einbindung von einigen Metern vor Beginn der Rammung ist auf die Eindringung des Pfahles infolge seines Eigengewichtes (self penetration) nach dem Aufrichten zurückzuführen. Bei etwa Schlag 3.400 und einer Einbindung von ca. 16 m wurde bei Pfahl 4 die Rammung für den Einsatz des HSD-Systems unterbrochen. Die Rammprotokolle wurden im Zuge der Analysen immer wieder zur Plausibilisierung und Interpretation der Messdaten herangezogen.

8.3 Pfahldynamik

Die über den gesamten Rammprozess aufgezeichneten Messdaten am Pfahl wurden zunächst mittels der Kalibrierdatenblätter der Sensoren in Beschleunigungen und Dehnungen umgerechnet. Die Dehnungssignale weisen applikationsbedingt eine Vordehnung und damit einen Nulllinienversatz auf. Da ausschließlich die dynamische Amplitude von Interesse ist, wurden die Dehnungsdaten mittelwertbereinigt und somit der Nulllinienversatz eliminiert. Darüber hinaus wurden für die Analysen im Zeitbereich sowohl die Dehnungs- als auch Beschleunigungsdaten einer Tiefpassfilterung mit einem digitalen Butterworthfilter 2. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 1000 Hz unterzogen, um unerwünschte Rauscheffekte zu minimieren.

Grundsätzlich dienen die Messungen der Pfahldynamik dem Ziel, generelle Abhängigkeiten der Pfahlschwingung zu identifizieren, um den Pfahl als Schallquelle charakterisieren zu können. Jede den Pfahl durchlaufende Dehnwelle, egal ob ab- oder aufwärts gerichtet, versetzt die Struktur erneut in Schwingung und führt zu einer weiteren Hydroschallbelastung sowie Anregung des Meeresbodens.

8.3.1 Energiebetrachtung

Generell wird in der Geotechnik der Energieeintrag in einen Pfahl zur Ermittlung der axialen Tragfähigkeit genutzt und durch dynamische Probelastungen ermittelt. Die Durch- und Nachweisführung ist u. a. in der EA Pfähle (DGGT, 2012) geregelt. Dazu genügt es, Beschleunigungs- und Dehnungsaufnehmer im Abstand vom 1,5-fachen des Pfahldurchmessers unterhalb des Pfahlkopfes zu applizieren und aus den Messsignalen infolge eines Rammschlages die Tragfähigkeit abzuleiten.

Im hier betrachteten Kontext ist weniger die Tragfähigkeit des Pfahles von Interesse. Vielmehr dient die Ermittlung des Energieeintrages im ersten Schritt zur Plausibilisierung der Eingangsdaten mit den Rammprotokollen. Der Fokus der Messungen liegt in der Analyse des Schwingungsverhaltens des Pfahles und deren Übertragung auf die Hydroschallausbreitung und Wellenausbreitung im Boden. Aus diesem Grund sind mehrere Messquerschnitte über die Pfahllänge verteilt angeordnet.

Die Beschreibung der durch einen Rammschlag im Pfahl hervorgerufenen dynamischen Vorgänge erfolgt unter der Annahme der eindimensionalen Wellentheorie mit dem Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf sowie dem Kraft-Zeit-Verlauf.

Durch die den Pfahl durchlaufende Welle kommt es zu Dehnungen und Bewegungen im betrachteten Pfahlquerschnitt. Theoretisch bewegt sich die Dehnwelle vom Pfahlkopf zum Pfahlfuss, wird dort reflektiert und bewegt sich wieder zurück zum Pfahlkopf, wo sie wiederum reflektiert wird. Gedämpft wird die Welle neben der Materialdämpfung des Stahles im Wesentlichen im Bereich der Einbindung des Pfahles durch den anstehenden Boden. Hierdurch reduziert sich die Energie der Welle, die Schwingungsamplituden werden kleiner.

Tatsächlich ist die Ausbreitungscharakteristik der Dehnwelle deutlich komplexer. Monopiles bestehen konstruktionsbedingt aus mehreren aneinandergeschweißten Ringen mit zum Teil unterschiedlichen Wandstärken. Jede dieser Stoßverbindung resultiert in einem Impedanzunterschied und führt folglich zu zusätzlichen Reflexionen der ab- und aufwärts gerichteten Dehnwelle.

Zur Ermittlung der Geschwindigkeits-Zeit-Verläufe wird die gemessene Beschleunigung für weiterführende Betrachtungen integriert. Der Index a steht hierbei für die axial ermittelten Signale.

$$v_a(t) = \int a_a(t) dt \quad (8.1)$$

Bild 57 zeigt die gemessene axiale Beschleunigung (oben) sowie axiale Dehnung (unten) aufgezeichnet an MQ1a bei Pfahl 7 beim Rammschlag 1100. Aus der Beschleunigung wurde gemäß Gleichung (8.1) die Geschwindigkeit ermittelt und die Daten wie erläutert einer Tiefpassfilterung unterzogen. Deutlich erkennbar ist sowohl im Geschwindigkeits- (v_a) als auch Dehnungssignal (ε_a) der Einleitungsimpuls bei etwa 15 ms. Zur Plausibilisierung der gemessenen Daten ist es zunächst wichtig, dass die Daten vor dem Impuls bei Null verlaufen und auch nach dem Ausschlagen des Pfahles wieder einen Wert von Null annehmen. Beides ist in den aufgezeichneten Daten bereits ohne Filterung der Fall, was auf eine korrekte Funktion der Sensoren hindeutet.

Neben den Beschleunigungen kommt es im betrachteten Pfahlquerschnitt zu Dehnungen, die in der Regel der Elastizitätstheorie unterliegen. Entsprechend dem Hooke'schen Gesetz können aus diesen Dehnungen die im betrachteten Bereich herrschenden Spannungen und unter Berücksichtigung der Pfahlquerschnittsfläche die Kräfte bestimmt werden, sodass sich analog zu den Geschwindigkeiten ein Kraft-Zeit-Verlauf ermitteln lässt.

$$F_a(t) = \varepsilon_a(t) \cdot E \cdot A \quad (8.2)$$

Aus der Kombination von Kraft- und Geschwindigkeitsverlauf lässt sich die in den Pfahl eingeleitete bzw. vorhandene Energie im Querschnitt bestimmen.

$$E_a(t) = \int F_a(t) \cdot v_a(t) dt \quad (8.3)$$

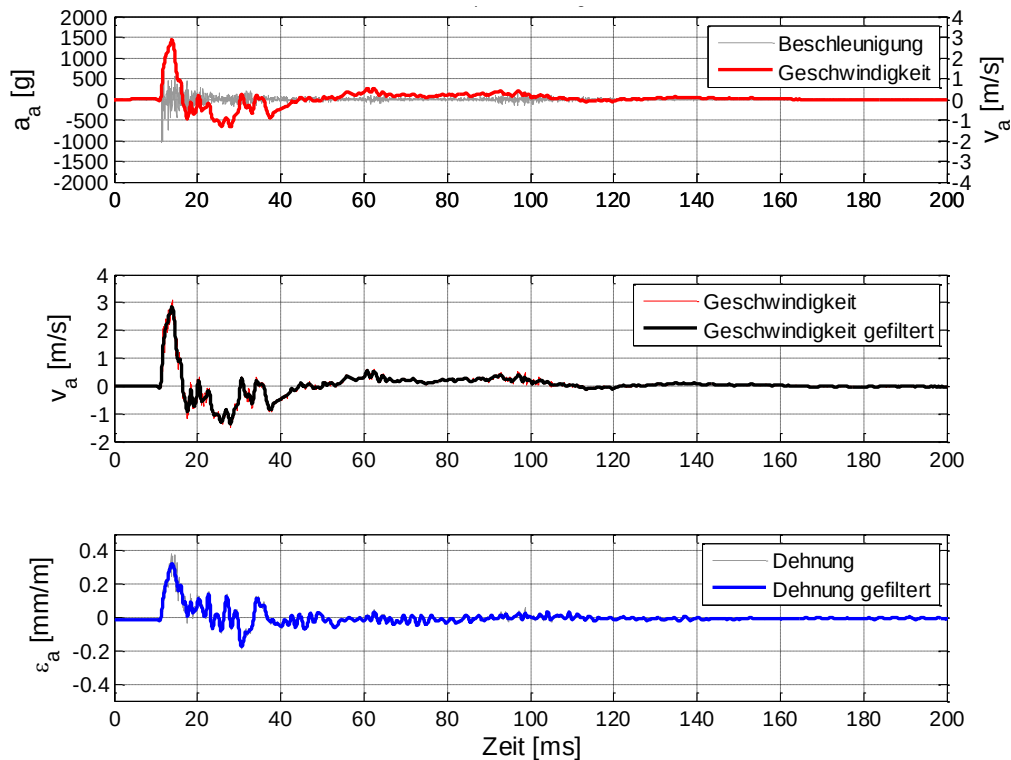


Bild 57: axiale Beschleunigung und Dehnung sowie daraus integrierte und gefilterte Verläufe aus Rammschlag 1.100 bei Pfahl 7 an MQ1a

Die aus Bild 57 nach diesen Gleichungen errechneten Größen zeigt Bild 58. Aufgrund der zeitsynchronen Darstellung der drei Verläufe wird deutlich, dass der Energiezuwachs maßgeblich aus den Amplituden des Einleitungsimpulses resultiert.

Es sind darüber hinaus weitere Informationen in dieser Darstellung enthalten. Der Messquerschnitt befindet sich 9,25 m unterhalb des Pfahlkopfes und hat zum Pfahlfuss einen Abstand von 45,5 m. Bei einer theoretischen Geschwindigkeit der Dehnwelle im Pfahl von 5.122 m/s ergibt sich Zeitversatz von 17,75 ms den die Welle benötigt, um sich vom Messquerschnitt zum Pfahlfuß und wieder zurück und weitere 3,6 ms um sich weiter zum Pfahlkopf und zurück zu bewegen. Die zwischenzeitlichen Reflexionen resultieren aus den angesprochenen herstellungsbedingt zusammengeschweißten Stößen.

Im Kraftverlauf wird zudem der in Kapitel 4.3 angesprochene Vorzeichenwechsel der Dehnwelle deutlich, der aus dem freien Ende des Pfahles resultiert. Die als Druckwelle hinablaufende Welle wird am Pfahlfuß bei 31 ms als Zugwelle reflektiert, kehrt sich am freien Ende des Pfahlkopfes wieder in eine Druckwelle um und passiert den Messquerschnitt nach 35 ms erneut. Die reduzierten Wellenanteile der Einleitungsamplitude werden durch Dämpfungserscheinungen sowie Energieumwandlungsprozesse innerhalb

der Scherzone aufgrund der Pfahleinbindung entzogen. Es kommt zu keinen weiteren Reflexionen und damit Wellendurchläufen.

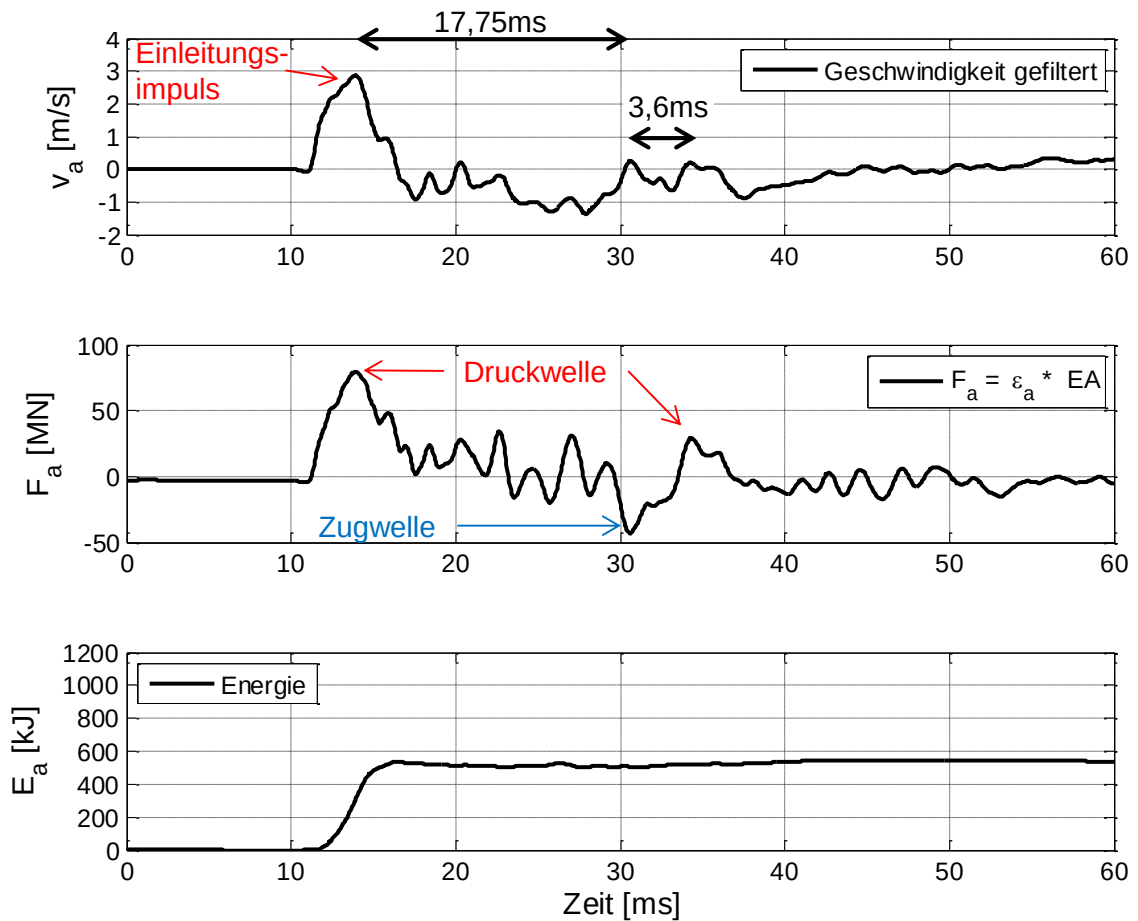


Bild 58: axiale Geschwindigkeit v_a (oben), errechneter Kraftverlauf F_a (Mitte) und errechnete Energie E_a (unten) aus Rammschlag 1.100 bei Pfahl 7 an MQ1a

Nach (Fischer, et al., 2014) wird die eingeleitete Energie entsprechend der klassischen Ermittlung wie hier dargestellt über das gesamte Messsignal von $v_a(t)$ und $\varepsilon_a(t)$ bzw. $F_a(t)$ durchgeführt. Das ist nicht vollständig korrekt, da sich wie beschrieben die Anteile aus ab- und aufwärts gerichteten Wellen überlagern und es somit zu einer Überschätzung der real vorhandenen Energie kommt (Siegl, 2017). Korrekterweise ist der Wert bei Erreichen des initialen Maximums (in diesem Fall bei etwa 14 ms) zu verwenden. Befindet sich ein Messquerschnitt in zu geringem Abstand zum Pfahlfuß, kommt es zu einer direkten Überlagerung der ab- und aufwärts gerichteten Welle, so dass eine korrekte Bestimmung der Energie nicht mehr möglich ist.

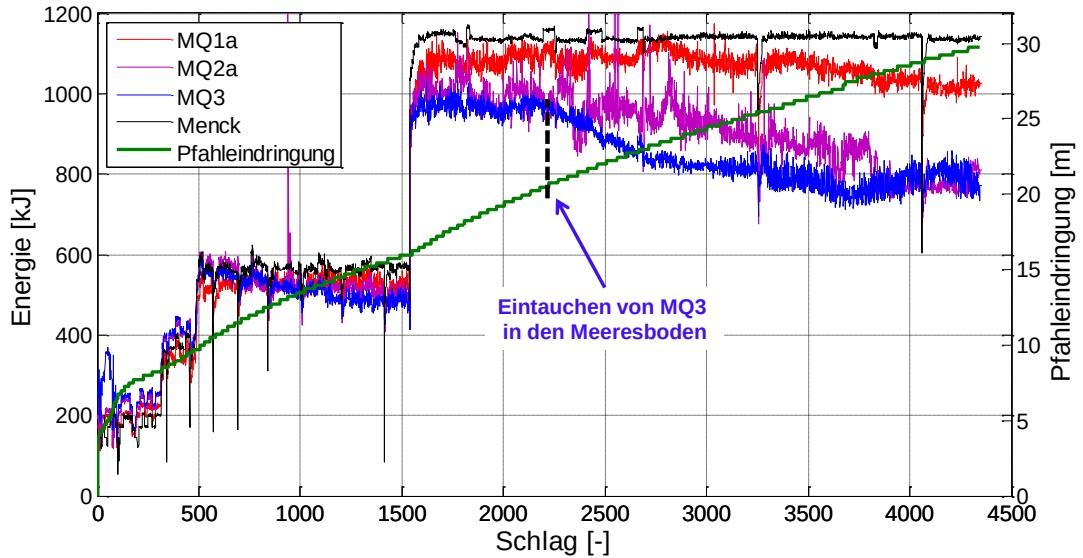


Bild 59: Gegenüberstellung der Rammenergien des Rammprotokolls zu den Messquerschnitten in Korrelation zur Pfahleindringung

In Bild 59 sind der aus dem Rammprotokoll entnommenen Rammenergie (schwarz) die an den Messquerschnitten errechneten Rammenergien (rot, magenta, blau) sowie der korrelierenden Pfahleindringung (grün) gegenübergestellt. Werte für den MQ4 konnten nicht ermittelt werden, da der Dehnungsaufnehmer keine plausiblen Daten erzeugt hat. Grundsätzlich ergibt sich sowohl qualitativ als auch quantitativ eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse zum Rammprotokoll. Die sukzessive Steigerung der Rammenergie wird durch die Messergebnisse sehr gut abgebildet. Die drei Messquerschnitte befinden sich bis zu einer Pfahleindringung von etwa 21 m oberhalb des Meeresbodens und weisen insbesondere bis etwa zum Schlag 1.550 eine nahezu identische Rammenergie auf. Mit der Erhöhung der Rammenergie auf 1.140 kJ ergeben sich größere Differenzen. Mit dem Eintauchen von MQ3 in den Meeresboden bei etwa Schlag 2.200 nimmt die ermittelte Energie in diesem Messquerschnitt mit vorschreitender Eindringung aufgrund wachsender Mantelreibung stetig ab.

Insbesondere bei MQ1 sind nur geringe Übertragungsverluste zwischen Rammhammer und Pfahl zu erkennen, wie die in Bild 60 visualisierte Übergangseffizienz η_t zeigt. Diese gibt das Verhältnis der ermittelten Energie im Pfahlquerschnitt E_a zur kinetischen Energie des Rammhammers E_i an (Fischer et al., 2014).

$$\eta_t = \frac{E_a}{E_i} \quad (8.4)$$

Infolge eines Rammschlages kommt es durch zwei Faktoren zu Energieverlusten, die durch die Übergangseffizienz beschrieben werden. Zum einen kommt es zu einer Differenz zwischen der potentiellen Energie der Fallmasse aus einer definierten Fallhöhe und der kinetischen Energie bei Auftreffen der Fallmasse auf die Schlaghaube des Hammers. Zum anderen entstehen durch Reibung thermische Verluste, die dafür sorgen, dass nicht 100 % der kinetischen Energie in den Pfahl übertragen werden.

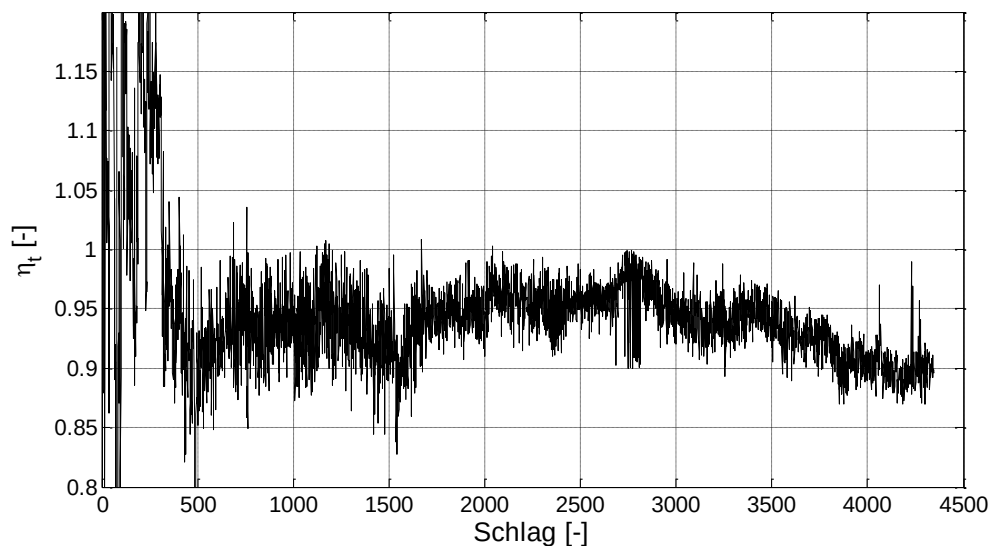


Bild 60: Übergangseffizienz zwischen dem Rammhammer und MQ1
bei der Rammung von Pfahl 7

In Bild 60 ist die Übergangseffizienz zwischen dem MQ1 und Rammhammer für jeden Rammschlag beim Pfahl 7 dargestellt. Bis etwa zum Schlag 300 sind mathematisch Werte von größer 1 ermittelt, die praktisch nicht auftreten können. Die Ursache dafür ist später bei genauerer Analyse der Messdaten tiefergehender untersucht (vgl. Bild 64) und bleibt an dieser Stelle zunächst offen. Mit fortschreitender Rammung ergeben sich für die Übergangseffizienz Werte zwischen 90 % und 98 %. Derartige Größenordnungen erscheinen plausibel und wurden bereits an anderer Stelle während der Installation von Offshorerammpfählen ermittelt (Siegl, 2017).

Die bis hierher ausgewerteten Messdaten sind im Vergleich zum aktuellen Stand der Wissenschaft als plausibel einzuordnen, so dass im Folgenden weitergehende Analysen durchgeführt werden, um das Schwingungsverhalten der Pfähle besser zu verstehen.

8.3.2 Pfahlbelastung im Zeitbereich

Der Fokus der weiteren Analysen der Messdaten liegt zunächst in der Untersuchung der axialen Schwingungseigenschaften und zum Ende des Kapitels auf Querschwingungen in radialer Richtung. Dazu wird zunächst die Gleichmäßigkeit der Dehnwelle infolge des Einleitungsimpulses geprüft. Aufgrund von Imperfektionen in der Konstruktion des Rammhammers (z. B. Exzentrizität zwischen Fallmasse und Schlagplatte), des Flansches am Pfahlkopf, aber auch durch eine nicht exakte zentrische Platzierung des Hammers auf dem Pfahlkopf, kann es zu einem exzentrischen Einleitungsimpuls kommen. Die Folge ist eine ungleichmäßige Verteilung der Dehnwelle über den Pfahlkopfquerschnitt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass ab einem Abstand von $1,5D$ unterhalb des Pfahlkopfes eine ebene Wellenfront im Querschnitt vorausgesetzt werden kann (DGGT, 2012). Für Großrohrpfähle, zu denen die Monopiles zählen, ist dieses Kriterium bereits ab einem Abstand von $1D$ gegeben (Fischer, et al., 2014). Beide Kriterien sind bei den hier vorliegenden Pfählen mit einem Kopfdurchmesser mit $5,2\text{ m}$ und folglich einem Mindestabstand von $7,6\text{ m}$ eingehalten. Zur Kontrolle einer möglichen exzentrischen Krafteinleitung wurden bei Pfahl 7 in den Messquerschnitten 1 und 2 Sensoren in den Drittelpunkten des Pfahlumfanges angeordnet (vgl. Bild 41).

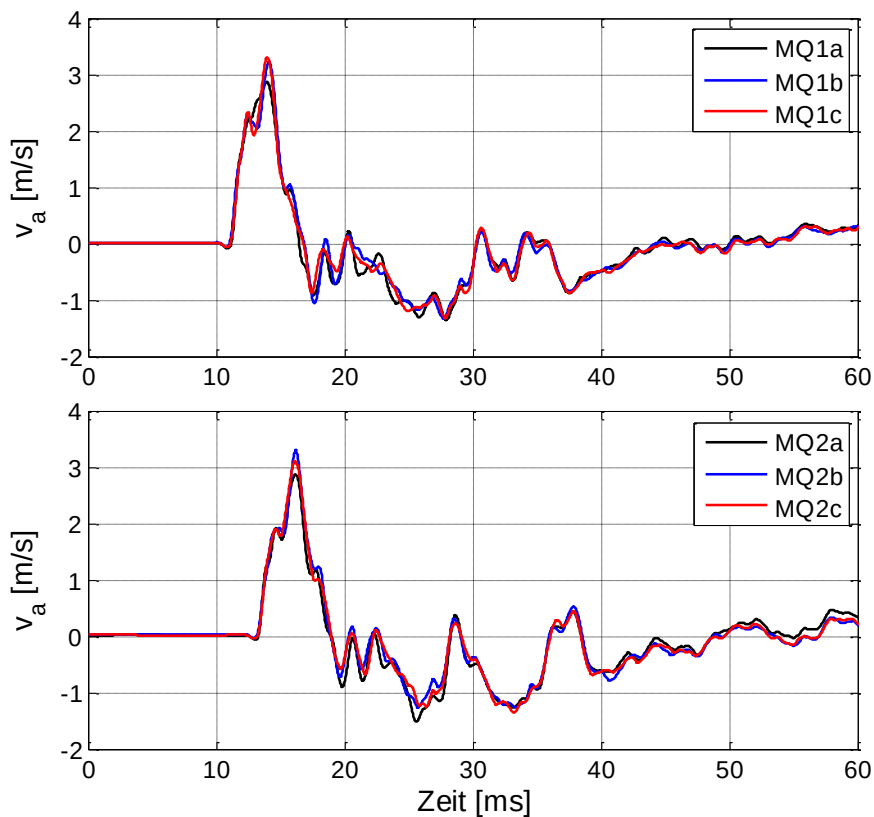


Bild 61: axiale Schwinggeschwindigkeit v_a aus Rammschlag 1.100
bei Pfahl 7 an MQ1 und MQ2

Die Charakteristik der axialen Dehnwelle in den Messquerschnitten ändert sich während der Rammung nur marginal, wie Bild 62 verdeutlicht. Oben sind die bereits bekannten Darstellungen der axiale Schwinggeschwindigkeit für einen Schlag für die Messquerschnitte 1a und 4 und jeweils darunter mit derselben Datenbasis als Kontourplot für jeden Rammschlag visualisiert. Die vertikale Ausrichtung der farbigen Bereiche unterstreicht ein gleichmäßiges Schwingungsbild des Pfahles über den gesamten Rammprozess.

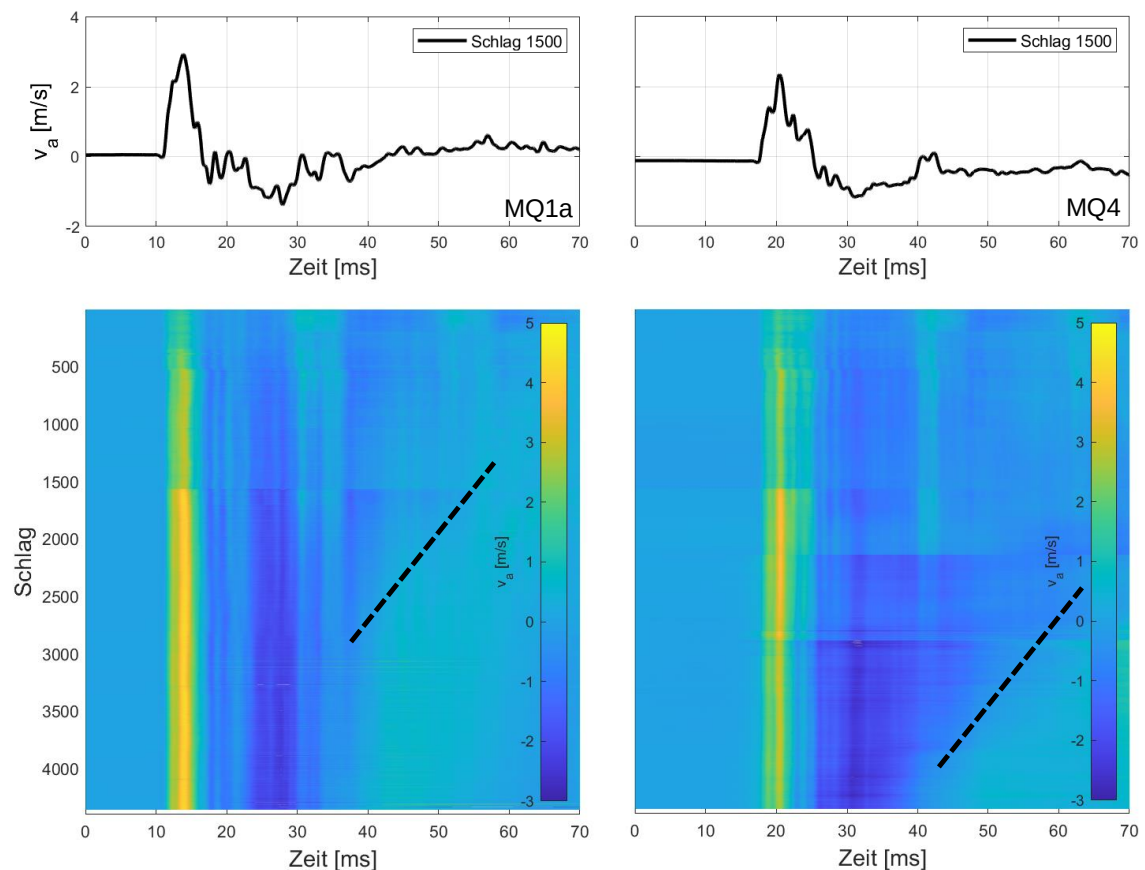


Bild 62: axiale Schwinggeschwindigkeit aus Rammschlag 1.500 (oben) und über alle Rammschläge (unten) an MQ1a (links) und MQ4 (rechts) bei Pfahl 7

Die maximale Geschwindigkeitsamplitude steigt analog zur Rammenergie an. Insbesondere an Messquerschnitt 1a, der nicht in den Meeresboden einbindet, ist der Maximalwert im Vergleich zu Messquerschnitt 4, der etwa ab Rammschlag 500 eintaucht sehr konstant. Hier ist auch bei der maximalen Rammenergie ab etwa Rammschlag 1.550 aufgrund wachsender Dämpfung eine Reduktion der Amplitude sichtbar. Im Bild sind der Einleitungsimpuls sowie die Reflexionen am Pfahlfuss eindeutig erkennbar. Diese zeigen sich bei jedem Rammschlag. Die sich im späteren Verlauf des Schlages zeigenden Reflexionen, markiert durch die gestrichelten Linien nehmen mit fortschreitendem Rammprozess ab. Auch hierfür ist vermutlich die Eindringtiefe und damit steigende

Dämpfung verantwortlich. Zur Charakterisierung der Schallquelle ist dies von untergeordneter Bedeutung, da die generelle Abhängigkeit im Wesentlichen vom Einleitungsimpuls sowie den Reflexionen am Pfahlfuss sowie weiteren Impedanzwechseln bestimmt ist.

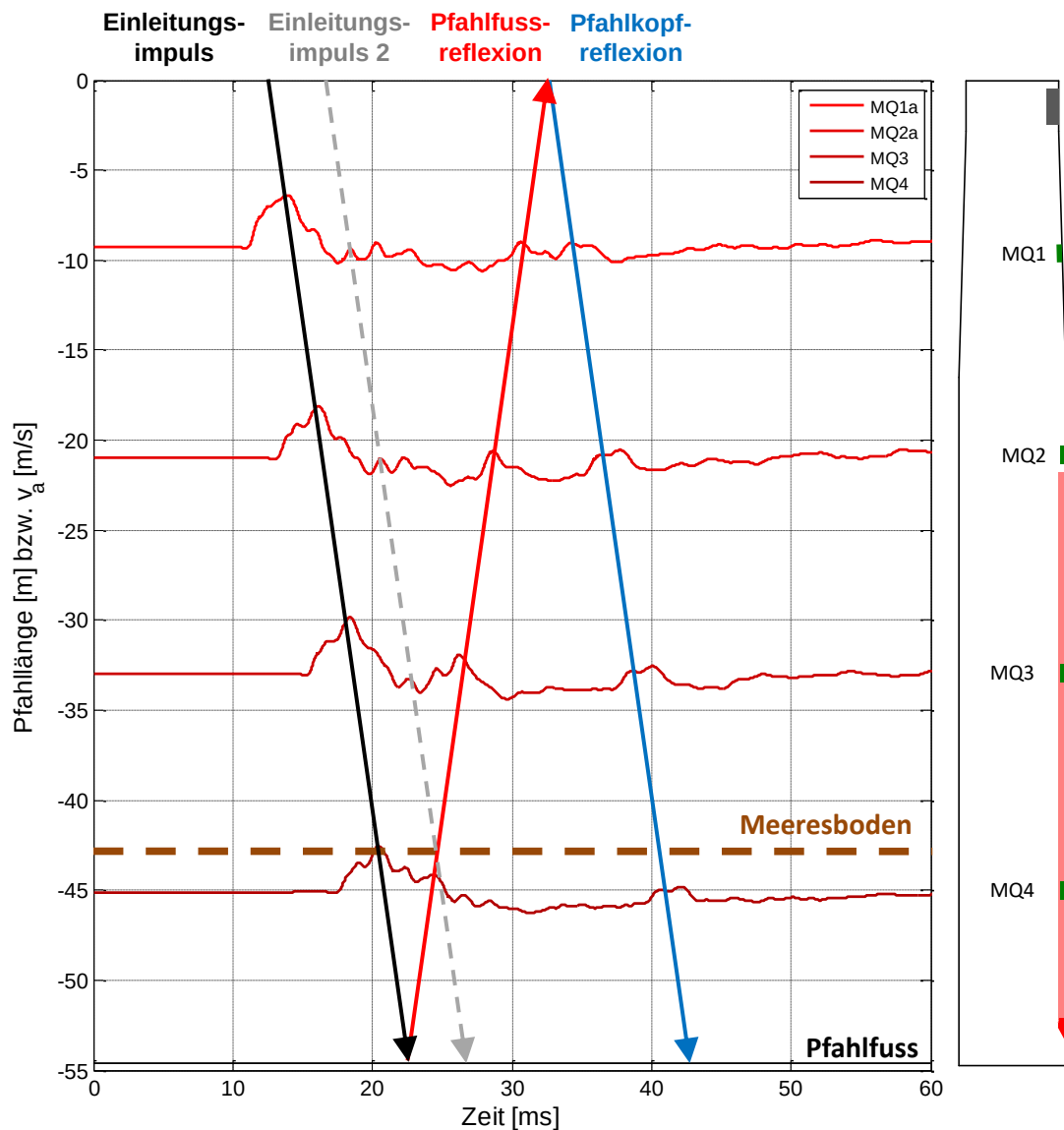


Bild 63: axiale Schwinggeschwindigkeiten v_a aus Rammschlag 1.100
bei Pfahl 7 an MQ1 bis MQ4

In Bild 63 ist der Dehnwellenverlauf an allen vier Messquerschnitten bei Pfahl 7 infolge eines Rammschlages gezeigt. Bild 64 zeigt dieselbe Darstellung für den Pfahl 4 an den acht Messquerschnitten infolge eines Rammschlages mit 200 kJ (links) zu Beginn der Rammung sowie mit maximaler Rammenergie (rechts) zum Ende der Rammung. Die Daten des Rammprotokolls des Pfahles 4 sind Bild 56 zu entnehmen. Die

Geschwindigkeitsverläufe der Sensoren in den Messquerschnitten sind darin auf die Position entlang der Pfahllänge projiziert und in der Amplitude nicht verändert.

Generell zeigt sich beim Vergleich dieser Messdaten beider Pfähle ein ähnlicher Verlauf, der sich so auch bei den Hydroschall- und Erschütterungsmessdaten widerspiegelt. Dies verdeutlicht, dass aus den vorhandenen unterschiedlichen Randbedingungen der Pfähle (Länge, Wandstärken) sowie Standorte (Geologie) keine wesentlichen Unterschiede des Schwingverhaltens der Pfähle resultieren und auch ein Vergleich der Messdaten unterschiedlicher Pfähle gerechtfertigt ist.

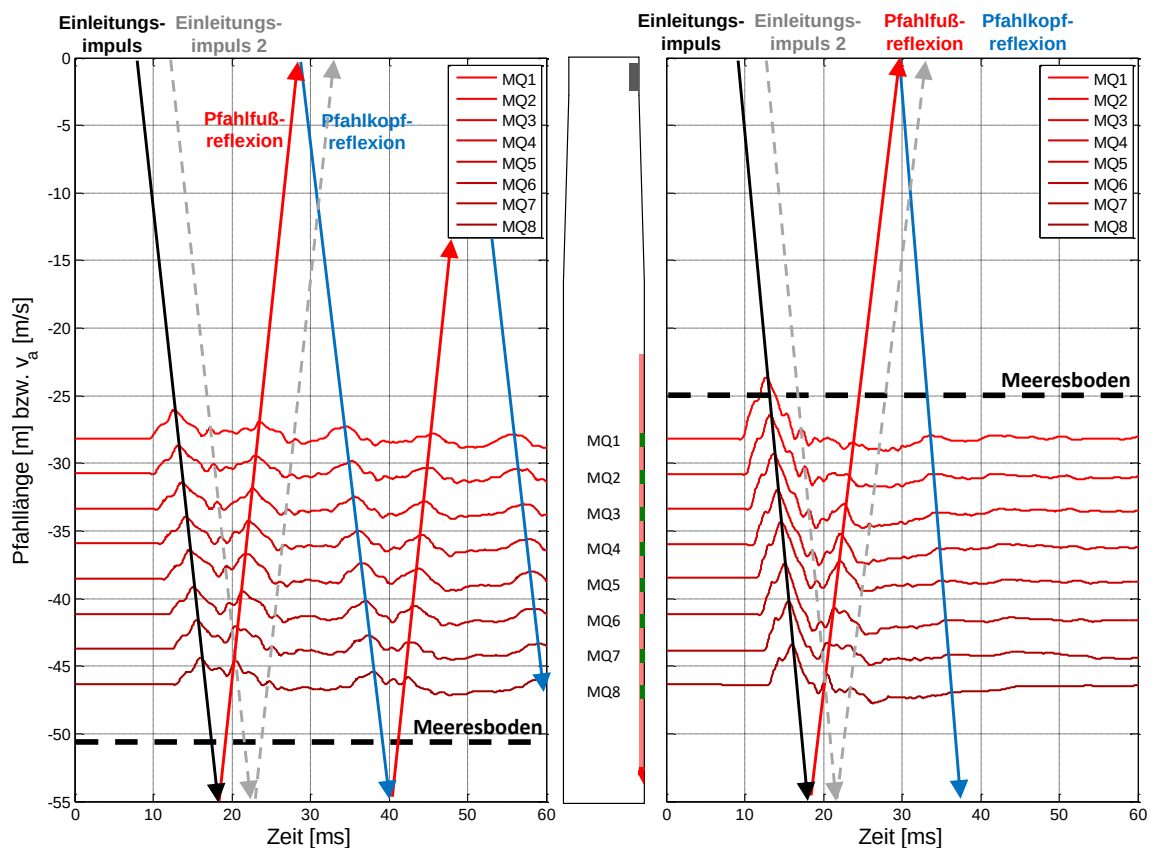


Bild 64: axiale Schwinggeschwindigkeiten v_a aus Rammschlag 25 (links) und 6.300 (rechts) bei Pfahl 4 an MQ1 bis MQ8

In den Bildern ist in schwarz der Hauptpfad des Einleitungsimpulses der Dehnwelle gekennzeichnet, die sich in axialer Richtung pfahlabwärts bewegt. An den Messquerschnitten ist mit einem Zeitversatz der Wellendurchlauf der initialen Welle gut erkennbar. Darüber hinaus zeigen die Signale ca. 4 ms bis 5 ms nach dem initialen Einleitungsimpuls eine zweite Wellenfront (grau), die vermutlich durch ein erneutes Aufschlagen des Fallgewichtes oder einem Hüpfen der Schlaghaube erzeugt wird. Die stark ausgeprägte Reflexion am Pfahlfuß (rote Linie) sowie leicht ausgeprägte Reflexion am Pfahlkopf (blaue

Linie) folgen im weiteren Verlauf. Durch den Meeresboden oder Impedanzsprünge hervorgerufene Reflexionen sind in den Signalen nicht erkennbar.

Deutliche Unterschiede zeigen sich beim Vergleich der beiden Geschwindigkeitsverläufe in Bild 64. Zum Ende der Rammung im rechten Diagramm besitzt die Dehnwelle aufgrund der höheren Rammenergie einen größeren Maximalwert. Zudem wird die Dehnwelle jeweils einmal am Pfahlfuß und Pfahlkopf reflektiert. Beim zweiten Hinablaufen ist die Dämpfung bereits so groß, dass die Dehnwelle den Pfahlfuß nicht mehr erreicht. Im Gegensatz dazu durchläuft die Dehnwelle den Pfahl zu Beginn der Rammung (links) mehrfach und ist auch nach der zweiten Pfahlkopfreflexion noch ausgeprägt vorhanden. Ursache hierfür ist die sehr geringe Pfahleindringung von ca. 4 m und damit nur in geringem Maße vorhandene Dämpfung durch den Meeresboden. Dieses mehrfache vollständige Durchlaufen des Pfahles bewirkt auch die zum Beginn der Rammung in Bild 60 ermittelte Übergangseffizienz der Energie von größer 1. Es wird folglich nach Gleichung 8.3 nicht nur die Energie infolge des Einleitungsimpulses ermittelt, sondern zusätzlich der Energiegehalt der reflektierten Dehnwelle. Mit fortschreitender Rammung und wachsender Pfahleinbindung in den Meeresboden reduziert sich dieser Effekt und die Welle durchläuft den Pfahl nur noch maximal einmal.

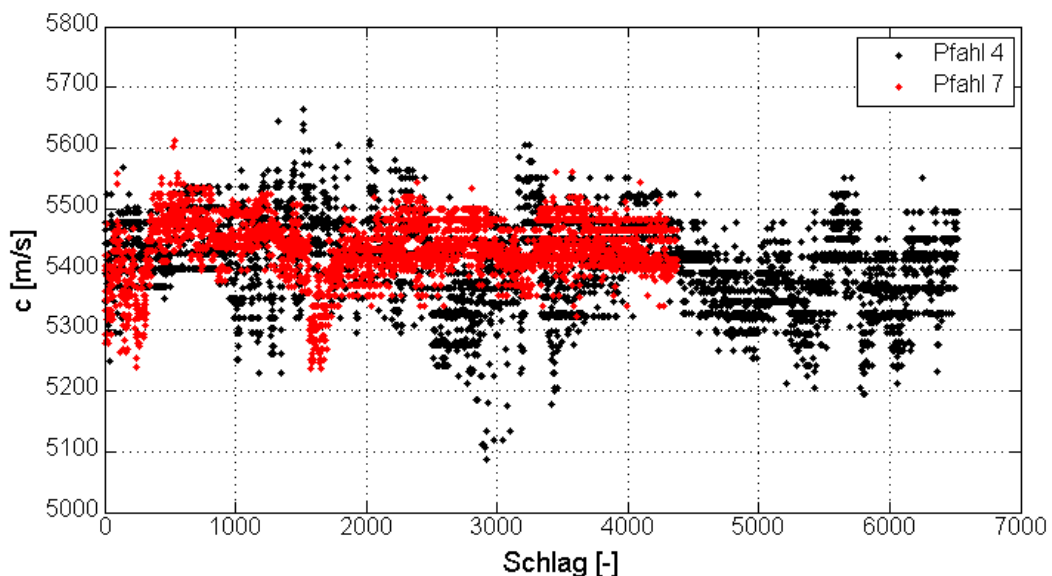


Bild 65: Mittelwert der ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeit der axialen Dehnwelle für jeden Rammschlag zwischen den Messquerschnitten bei Pfahl 4 und Pfahl 7

Aus den zeitlichen Abständen des Einleitungsimpulses an den Messquerschnitten und den bekannten Abständen der Sensoren untereinander lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der axialen Dehnwelle infolge des Einleitungsimpulses ermitteln. In Bild 65 ist der Mittelwert der einzelnen Messquerschnitte für beide Pfahlinstallation

dargestellt. Diese befindet sich bei beiden Pfählen zwischen 5.200 m/s und 5.500 m/s und zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem aus Gleichung 4.4 errechneten Wert für Stahlrohre.

Die radiale Pfahlschwingung ist im Gegensatz zur axialen Schwingung der untersuchten Pfähle keineswegs gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Bild 66 zeigt eine Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsverläufe an zwei Messquerschnitten eines Ramm-schlages gemessen bei Pfahl 7. Der bereits beschriebene Einleitungsimpuls in axialer Richtung ist mit geringerer Amplitude ebenfalls in radialer Richtung zu erkennen. Die darauffolgenden Verläufe divergieren stark und lassen keine klaren Abhängigkeiten hinsichtlich einer Pfahlfuss- oder Pfahlkopflexion erkennen. Die Amplitudenabnahme ist im Vergleich in radialer Richtung deutlich geringer, was dazu führt, dass der Pfahl in radialer Richtung länger schwingt als in axialer.

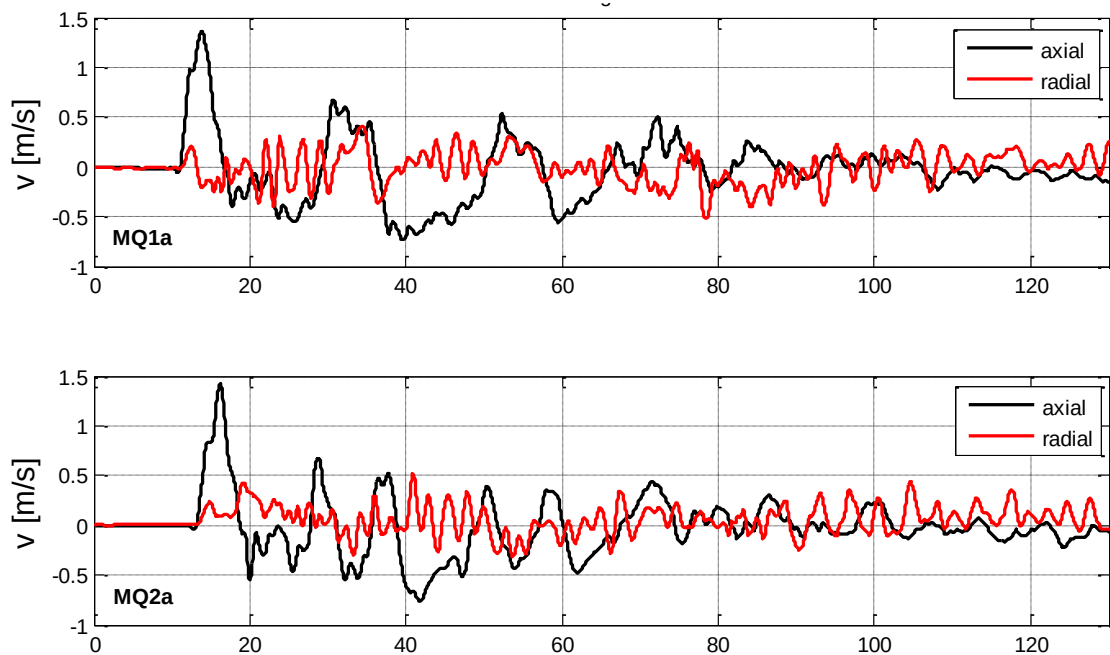


Bild 66: Gegenüberstellung der axialen und radialen Geschwindigkeit aus
Ramm Schlag 100 bei Pfahl 7 an MQ1a (oben) und MQ2a (unten)

Die Auswertung der maximalen und minimalen Beschleunigungsamplituden für jeden Ramm Schlag in den vier Messquerschnitten in axialer und radialer Richtung bei Pfahl 7 zeigt Bild 67. Um den Einfluss der Rammenergie zu verdeutlichen, ist sie ebenfalls in den Diagrammen in blau dargestellt.

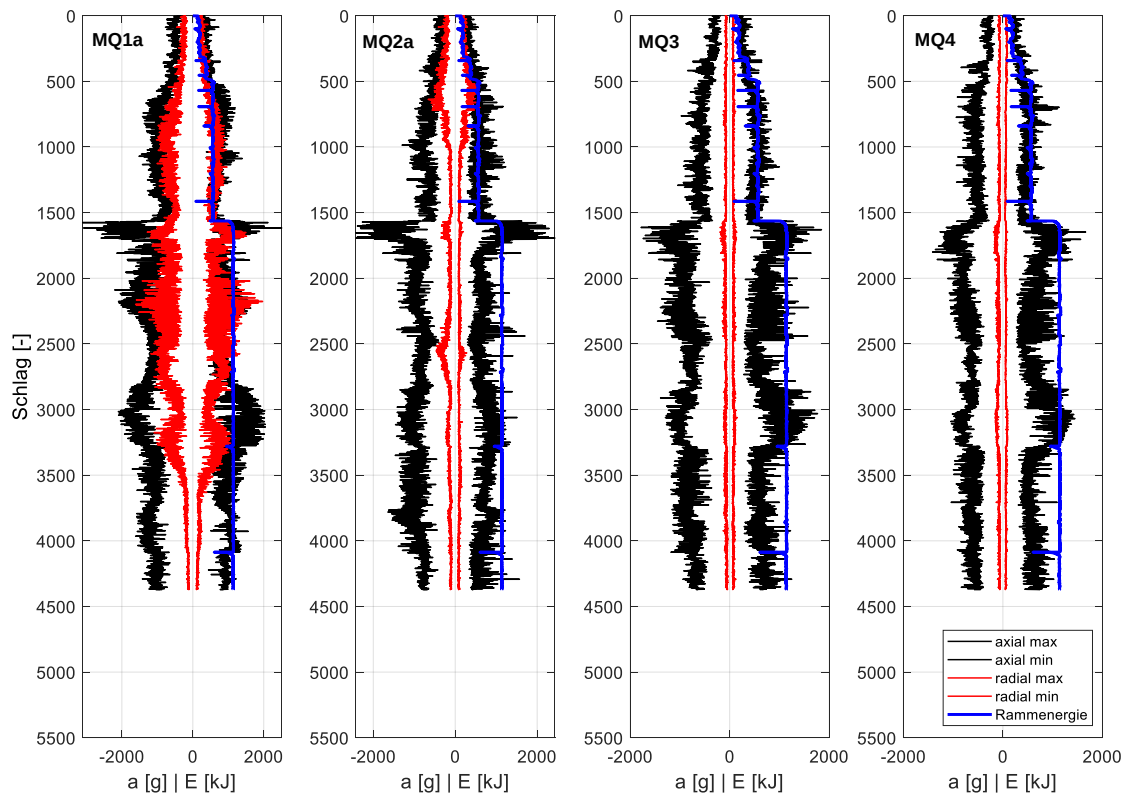


Bild 67: minimale und maximale Beschleunigung jedes Rammschlages in axialer und radialer Richtung bei Pfahl 7 an den Messquerschnitten

Mit einer Erhöhung der Rammenergie geht ein Anstieg der Beschleunigung einher. Dies wird insbesondere beim Anstieg auf die maximale Energie etwa bei Rammschlag 1.600 deutlich. Die größten Beschleunigungen werden zu diesem Zeitpunkt am Messquerschnitt 1a mit über 2.000 g ermittelt.

Grundsätzlich sind qualitative Ähnlichkeiten der Kurven mit einer gewissen Varianz in axialer Richtung erkennbar. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei den radialen Beschleunigungen ein anderes Bild. Während die Amplituden insbesondere an MQ1a (bis etwa Rammschlag 3.600) und MQ2a (bis etwa Rammschlag 1.000) vergleichsweise stark variieren, zeigen sich bei MQ3 und MQ4 sehr gleichmäßige und konstante Verläufe. Dies ist sehr wahrscheinlich auf die Pfahleinbindung in den Meeresboden (vgl. Bild 41) und damit den Grad der Einspannung zurückzuführen. Die Messquerschnitte 1 und 2 befinden sich während der gesamten Rammung oberhalb des Meeresbodens. Die Messquerschnitte 3 (etwa ab Rammschlag 2.500) und 4 (etwa ab Rammschlag 500) tauchen während der Rammung in den Meeresboden ein. Der Pfahl wird in Folge dessen in seiner Querschwingung behindert, was dazu führt, dass die Beschleunigungsamplituden geringer sind, als in den Bereichen oberhalb der Einbindung. Augenscheinlich ist dies

jedoch nicht erst mit dem Eintauchen des Messquerschnittes in den Meeresboden der Fall, sondern bereits deutlich früher. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass sich das Schwingungsverhalten des Pfahles während des Rammprozesses permanent verändert. Zum gleichen Ergebnis kommt die Analyse beim Pfahl 3, bei dem es jedoch aufgrund der konzentrierten Anordnung der Messquerschnitte auf der unteren Pfahlhälfte weniger stark ausgeprägt ist.

8.3.3 Schwingungsverhalten des Pfahles im Frequenzbereich

Wie die Analyse der Pfahlbeschleunigung in axialer und radialer Richtung gezeigt hat, verändert sich das Schwingungsverhalten des Pfahles aufgrund sich ändernder Pfahleinbindung fortwährend. Neben der Untersuchung der Dehnwelle im Zeitbereich ist folglich zur Beschreibung der Charakteristik des Pfahles als Schallquelle auch die Betrachtung des Frequenzbereiches von großer Bedeutung. Insbesondere deshalb, weil das Gehör der Schweinswale, ähnlich zu dem von Menschen frequenzabhängig reagiert.

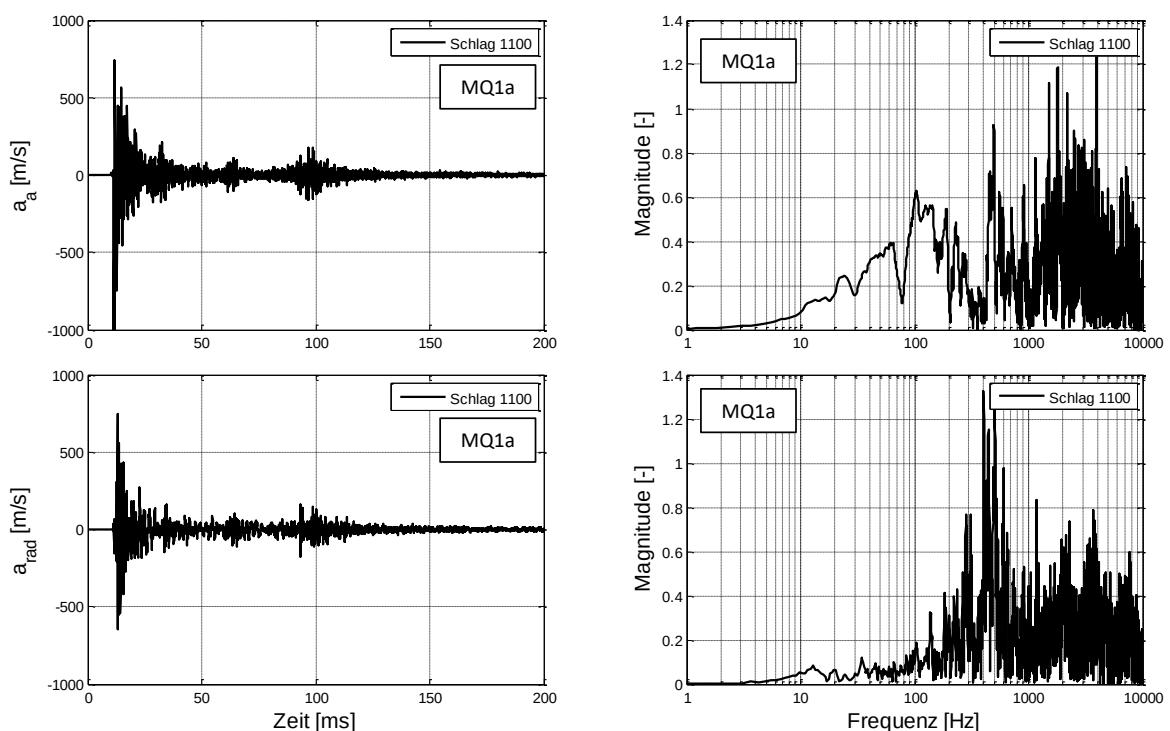


Bild 68: axiale und radiale Beschleunigung (links) und daraus ermitteltes Frequenzspektrum (rechts) am Pfahl 7 am MQ1a bei Rammschlag 1200

Aus diesem Grund werden die aufgezeichneten diskreten Daten des Zeitbereiches einer komplexen Transformation in den Frequenzbereich unterzogen. Grundlage dafür sind die ungefilterten Rohdaten der axialen und radialen Beschleunigungen. Dies ist

exemplarisch für einen Rammschlag in Bild 68 am Messquerschnitt 1a gezeigt. Links ist jeweils das Beschleunigungssignal in axialer und radialer Richtung und rechts das daraus berechnete Frequenzspektrum nach der Fast Fourier Transformation (FFT) dargestellt.

Das Signal in axialer Richtung (oben) lässt sich in einen tieffrequenten und einen hochfrequenten Bereich unterteilen. Der tieffrequente Bereich befindet sich zwischen 10 Hz und 400 Hz und ist offensichtlich mit Vergleich zu Bild 25 maßgeblich für die Schallbelastung im Wasser verantwortlich. In diesem Bereich ergibt sich ein lokales Maximum zwischen 100 Hz und 150 Hz. Der hochfrequente Bereich oberhalb von 400 Hz weist ebenfalls lokale Peaks auf, ist jedoch aufgrund des verhältnismäßig geringeren Energieinhaltes für die Schallbelastung zweitrangig.

Im Signal in radialer Richtung sind im Vergleich dazu größtenteils hochfrequente Schwingungen dominierend. Frequenzen unterhalb von etwa 200 Hz sind nur im geringen Maße im Signal enthalten.

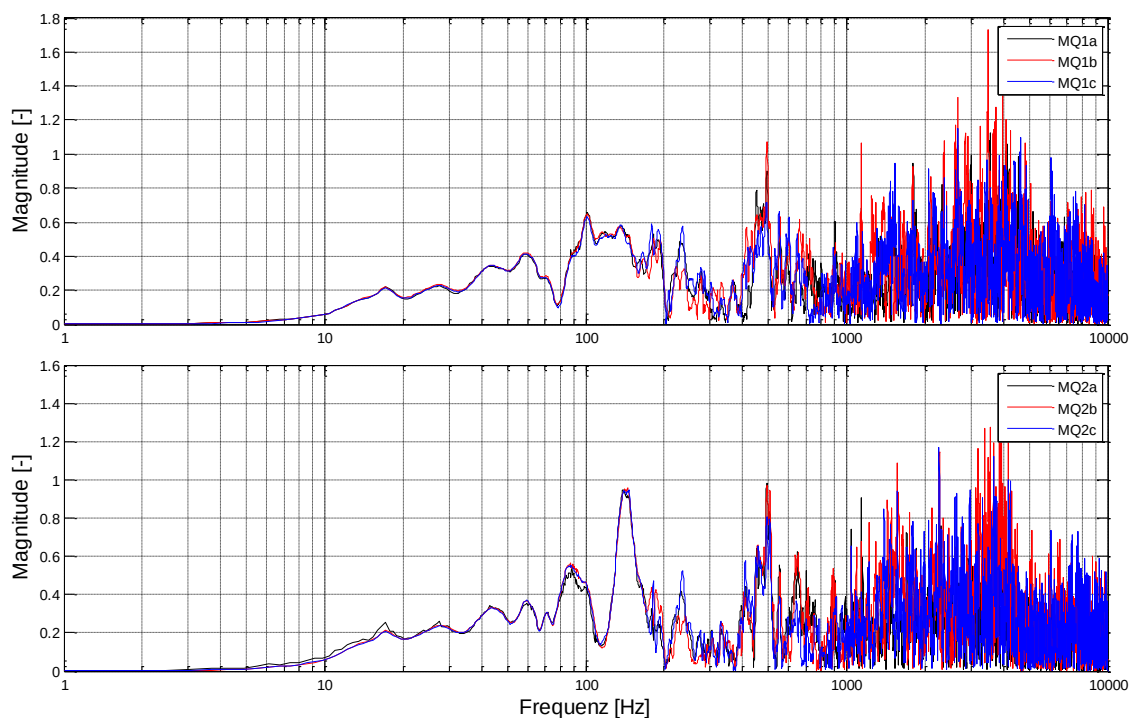


Bild 69: Frequenzanalysen der axialen Beschleunigung in den Drittelspunkten
an MQ 1 und 2 am Pfahl 7 bei Schlag 1200

Belegt wird dies auch durch die Betrachtung der Frequenzanalysen der axialen Beschleunigungen innerhalb eines Messquerschnittes (Bild 69). Diese sind im tieffrequenten Bereich nahezu deckungsgleich und beginnen erst oberhalb von 400 Hz zu divergieren. Wie bereits erläutert unterstreicht dies erneut die gleichmäßige, ebene Wellenfront

im Pfahlquerschnitt, die zudem im oberen, nicht in den Boden einbindenden Pfahlteil dazu führt, dass im Wesentlichen hochfrequente radiale Pfahlschwingungen auftreten, die eine vergleichsweise geringe Energieabstrahlung bewirken.

Bisher wurden die Ergebnisse der Frequenzanalyse lediglich für einzelne Rammschläge in den Messquerschnitten betrachtet. Um darüberhinausgehende Informationen zum Schwingungsverhalten des Pfahles über die gesamte Pfahllänge sowie den gesamten Rammprozess zu gewinnen, wurden die Beschleunigungsdaten in axialer und radialer Richtung für jeden Rammschlag in jedem Messquerschnitt analysiert und in Form von Kontourplots in Bild 70 ausgewertet.

Darin ist oben zum besseren Verständnis das bereits erläuterte Ergebnis der Frequenzanalyse eines Rammschlages gezeigt. Darunter befinden sich für die gleichmäßig über die Pfahllänge verteilten (vgl. Bild 41) vier Messquerschnitte des Pfahles 7 die Frequenzanalysen jedes Rammschlages. Vertikal gleichmäßige Farbverläufe bedeuten keine Veränderungen des Frequenzspektrums von aufeinanderfolgenden Rammschlägen.

Deutlich wird bei den axialen Frequenzspektren auf der linken Seite, dass sich zwischen dem ersten bis dritten Messquerschnitt kaum Unterschiede ergeben und die maßgebenden Frequenzen zwischen 100 Hz und 150 Hz liegen. Das Spektrum verändert sich nur unwesentlich.

Beim Messquerschnitt 4 hingegen ist das Spektrum insgesamt tieffrequenter. Es sind deutlich geringere Frequenzanteile zu beobachten, die gegenüber den Frequenzen um 100 Hz dominieren. Diese verschieben sich von anfänglich etwa 50 Hz auf 40 Hz zum Ende der Rammung. Die Frequenzspektren der radialen Schwinggeschwindigkeiten auf der rechten Seite zeigen ebenfalls in den oberen drei Messquerschnitten vergleichbare Verläufe, allerdings mit dominierenden Frequenzen zwischen 10 Hz bis 40 Hz. Auch hier differiert das Ergebnis im Messquerschnitt 4 deutlich. Insbesondere mit fortschreitender Rammung und damit Pfahleinbindung verschwinden sämtliche Frequenzanteile größer 100 Hz. Dies ist zum Ende der Rammung hin auch beim Messquerschnitt 3 zu beobachten.

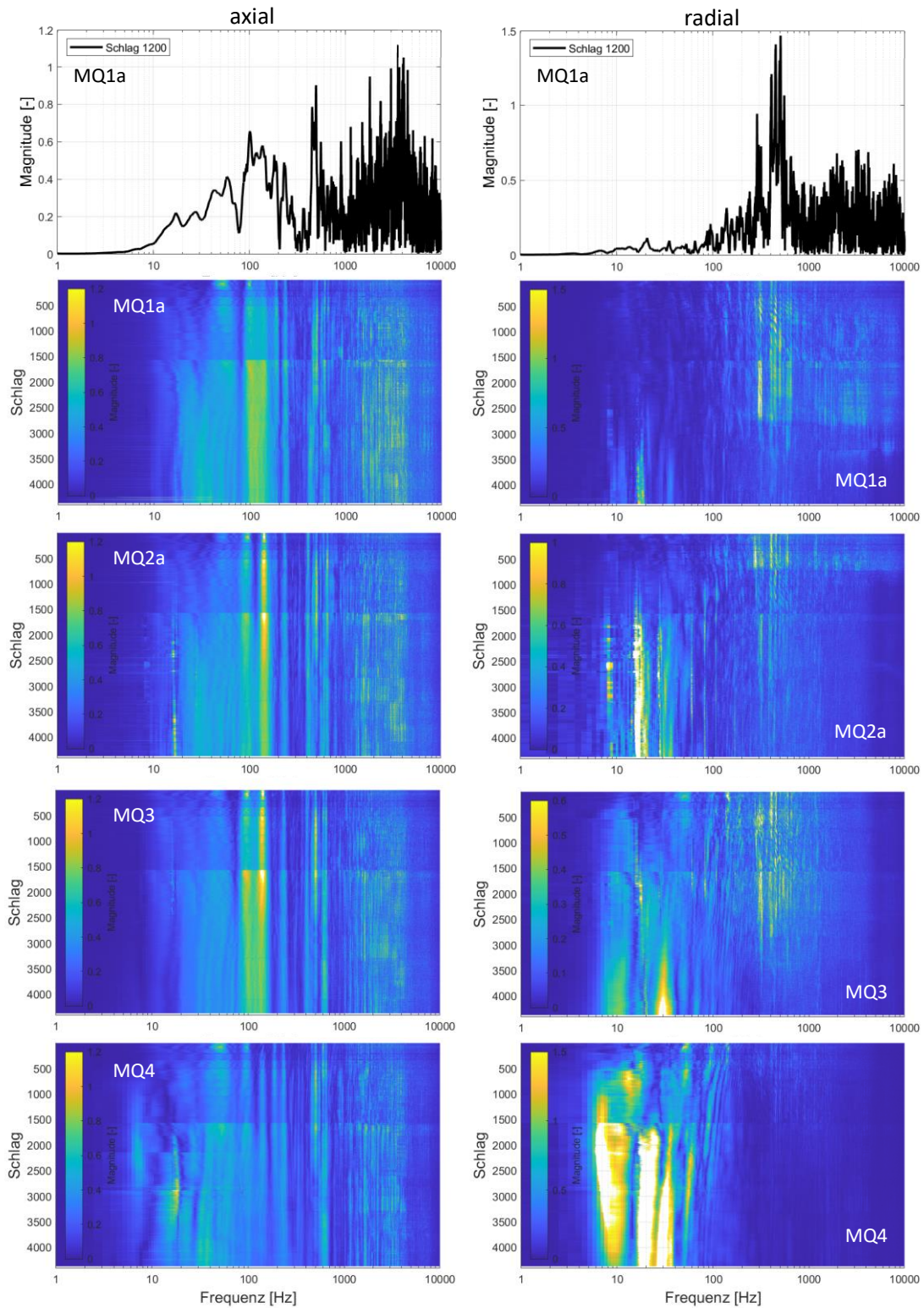


Bild 70: Frequenzanalysen der axialen (links) und radialen (rechts) Beschleunigungen innerhalb eines Messquerschnittes am Pfahl 7 über die Rammung

8.4 Hydroakustik

Nachdem im vorherigen Abschnitt das Schwingungsverhalten zur Beschreibung des Pfahles als Schallquelle untersucht wurde, liegt der Fokus dieses Abschnitts auf der Schallausbreitung im Wasser. Der Pfahl kann als punkt- bzw. linienförmige Schallquelle betrachtet werden. Der den Pfahl umgebende Wasserkörper und die darin stattfindende Schallausbreitung machen eine räumliche Betrachtung der Vorgänge notwendig. Aus diesem Grunde wurden insgesamt 21 Hydrophone sowohl über die Wassertiefe, als auch über den Abstand zum Pfahl positioniert und zeitsynchron gemessen.

8.4.1 Kalibrierung der Hydrophone

Aufgezeichnet wurden die Daten mit Hydrophonen vom Typ 8103 der Firma Brüel&Kjær. Da es sich bei diesen Sensoren um sehr sensible, hochgenaue Messgeräte handelt und um auch in jeder Messkampagne valide, untereinander vergleichbare Messdaten zu generieren, wurden die Messketten jeweils bestehend aus Sensor, Signalverstärker und Datenerfassung vor jeder Pfahlrammung einer Kalibrierung unterzogen. Dazu wurde unmittelbar vor Ausbringung der Hydrophonketten jeder Einzelsensor durch ein ebenfalls von Brüel&Kjær entwickeltes Pistonfon (hydrophone calibrator) vom Typ 4229 überprüft.

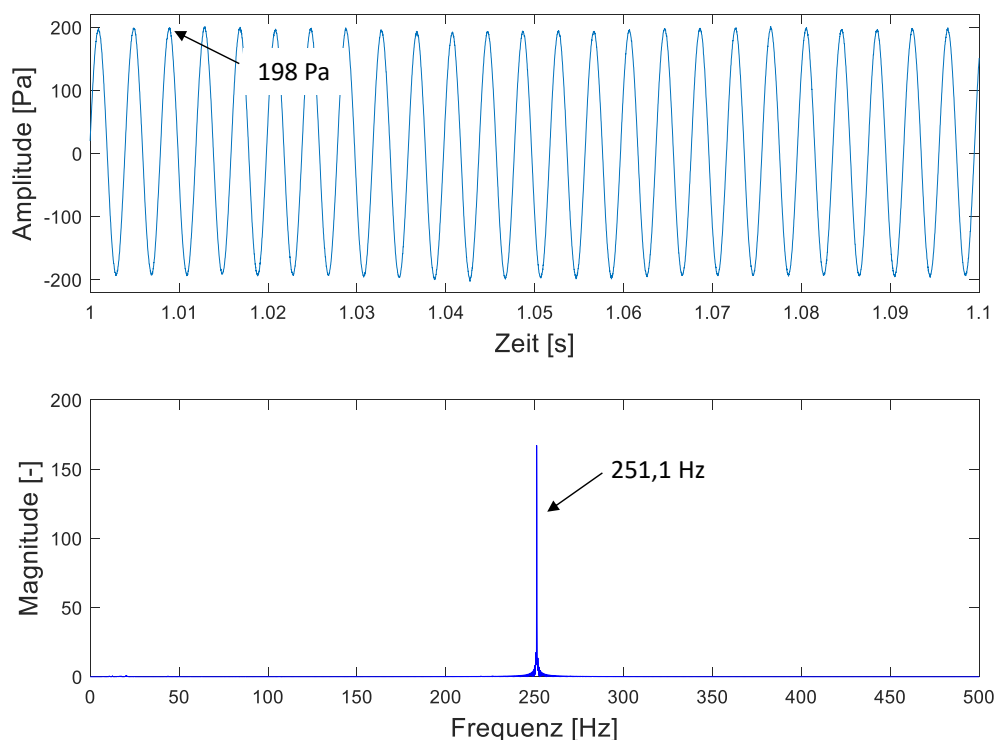


Bild 71: Kalibriersignal eines Hydrophons erzeugt durch ein Pistonfon

Das Pistonfon erzeugt in einem Hohlraum, in den das Hydrophon luftdicht eingeschoben wird, einen sinusförmigen Ton bzw. Schalldruck mit einem definierten Schalldruckpegel von $166 \pm 0,7$ dB re $1 \mu\text{Pa}$ bei einer Frequenz von 251,2 Hz. Laut Hersteller ist bei dieser Frequenz die Empfindlichkeit der Hydrophone in Luft und in Wasser fast identisch, so dass sie in Luft kalibriert werden können und kein nennenswerter Genauigkeitsverlust für den Einsatz im Wasser auftritt. In Bild 70 ist ein durch das Pistonfon erzeugtes Schalldrucksignal sowie das daraus ermittelte Frequenzspektrum exemplarisch für ein Hydrophon dargestellt.

Der harmonische Schalldruckverlauf hat eine maximale Amplitude von etwa 200 Pa, aus der sich nach Umrechnung nach Formel 2.1 ein Lärmpegel von 165,9 dB re $1 \mu\text{Pa}$ ergibt. Anhand des Frequenzspektrums zeigt sich eine Frequenz von 251,1 Hz und damit ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zum synthetischen Signal. Insgesamt konnte auf diese Weise für jede Messung die erforderliche Genauigkeit der Hydrophone nachgewiesen werden, die die Grundlage für den Vergleich der Messungen innerhalb der Messkampagnen bildet.

8.4.2 Analyse im Zeit- und Frequenzbereich

Im Rahmen der Messkampagnen wurden bei insgesamt acht Monopileinstallationen eine Vielzahl von Messdaten aufgezeichnet. In den folgenden Diagrammen werden stets ausgewählte Auswertungen gezeigt, anhand derer repräsentative Untersuchungsergebnisse anschaulich dargestellt sind, die sich bei sämtlichen Messungen unter vergleichbaren Randbedingungen ergeben haben.

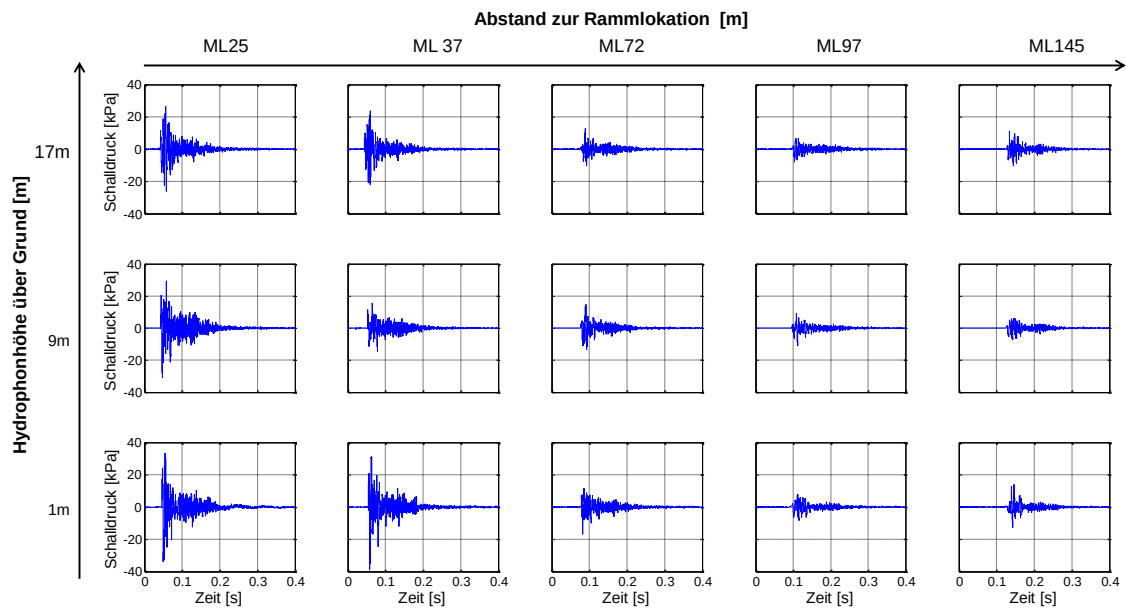


Bild 72: typischer Hydroschalldruckverlauf eines Rammschlages (Schlag 300) über die Wassertiefe und Entfernung zum Pfahl ohne Schallminderung im Nahbereich bei Pfahl 7

Im ersten Schritt der Analyse sind in Bild 72 exemplarisch für ausgewählte Sensoren im Nahbereich in Abhängigkeit der Höhe über dem Meeresboden und Entfernung zum Rammpfahl die ermittelten Hydroschalldruckverläufe im Zeitbereich für einen Rammschlag während der Installation eines Monopiles ohne Schallminderungssystem, folglich unbeeinflusster Schallausbreitung, abgebildet. Diese Darstellungen dienen einer ersten Plausibilisierung der Messdaten und zeigen ein typisches Hydroschallwellenausbreitungsverhalten. Die Position des Monopiles befindet sich gedanklich auf der linken Seite des Diagrammes. Die Schallwellen breiten sich vom Pfahl in radialer Richtung im Meerwasser aus und werden zuerst von den Sensoren bei der ML25 und in der Folge bei den übrigen Sensoren bis hin zur ML145 erfasst. Generell treten im Nahbereich die größten Amplituden mit Druckschwankungen (peak to peak) von 60 kPa auf. Diese können bei maximaler Rammenergie auf über 200 kPa ansteigen. Mit wachsender Entfernung sowie größer werdendem Abstand zum Meeresboden nehmen die Maximalamplituden

aufgrund der geometrischen Ausbreitungsdämpfung ab. Festzustellen ist, dass die Amplitudenreduktion im Wesentlichen in der ersten Hälfte des Schlages eintritt und die zweite Hälfte weitestgehend konstant bleibt. Auch die Schlagdauer ist bei allen Messpositionen mit etwa 0,2 Sekunden relativ konstant.

In Bild 73 ist der Bereich des Hydroschallwellenbeginns aus Bild 72 vergrößert dargestellt, um den Beginn des zeitlichen Durchlaufes der Welle, im Folgenden als Welleneinsatz bezeichnet, in den verschiedenen Wassertiefen und -entfernungen relativ zueinander näher untersuchen zu können. Der Welleneinsatz ist durch die roten punktierten Linien im Bild markiert. Die Hydroschallwelle bewegt sich vom Pfahl (gedanklich links) durch den Wasserkörper nach rechts hin aus, weshalb die absoluten Welleneinsatzzeiten von der ML25 zur ML145 kontinuierlich größer werden. Es wird entsprechend der theoretischen Vorstellungen aus Kap. 4.3 eine Neigung der Wellenfront über die Wassertiefe bei den ML25 und ML37 deutlich. Die Nachrechnung ergibt verglichen mit den theoretischen Vorstellungen eine Neigung von etwa 20° und stimmt mit einer Abweichung von 3° folglich gut überein (vgl. Kap. 4.3). In der Folge bei den weiter entfernten ML weicht das Messergebnis jedoch von der theoretischen Vorstellung ab. Die geneigte Wellenfront wandelt sich zu einer über die Wassertiefe ebenen Wellenfront um, die sich an allen drei betrachteten ML72 bis ML145 zeigt.

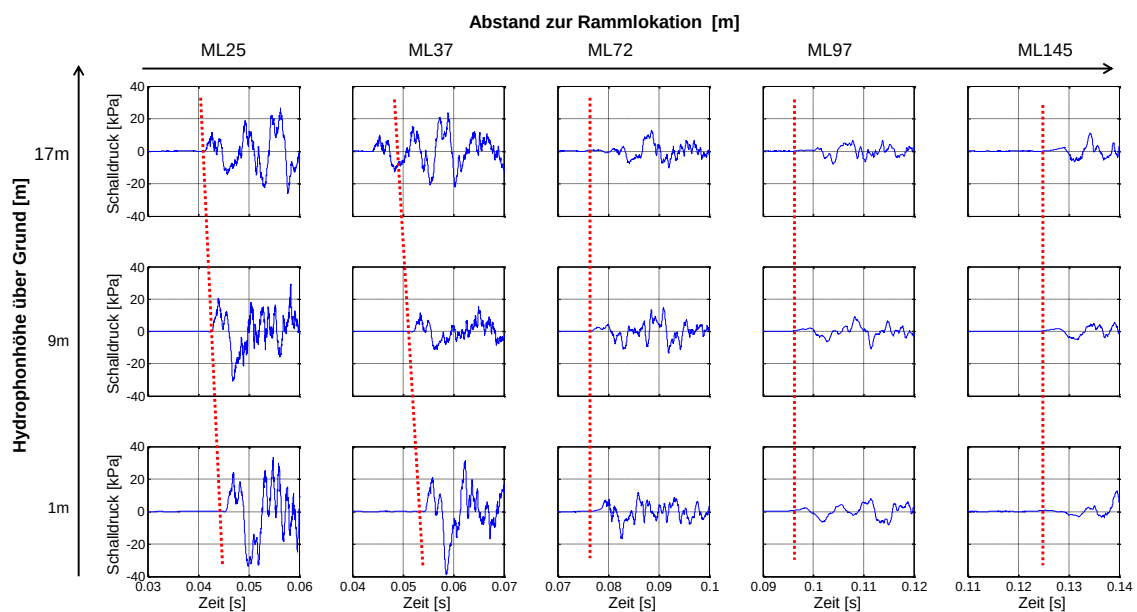


Bild 73: vergrößerter Bereich des Hydroschallwelleneinsatzes aus Bild 72

Eine Abschätzung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit hat sich anhand der Daten als nicht zielführend herausgestellt, da die Position der Messlokationen nicht exakt

aufgrund der Meeresströmung bestimmt werden konnte und bei den geringen Distanzen der Messlokationen untereinander bereits wenige Meter Ungenauigkeit einen relativ großen Einfluss auf die errechnete Ausbreitungsgeschwindigkeit hat.

Auch die Hydroschallausbreitung soll neben der Einzelschlagauswertung über den gesamten Rammprozess analysiert werden. Bild 74 und Bild 75 zeigen analog zu Bild 62 oben die bereits bekannten Darstellungen eines Einzelschlages für die ML25, ML145, ML400 und ML750 in jeweils 1 m über dem Meeresboden und jeweils darunter als Kontourplot für die Rammung visualisiert. Die Skalierung der Diagramme ist an die jeweilige Maximalamplitude angepasst.

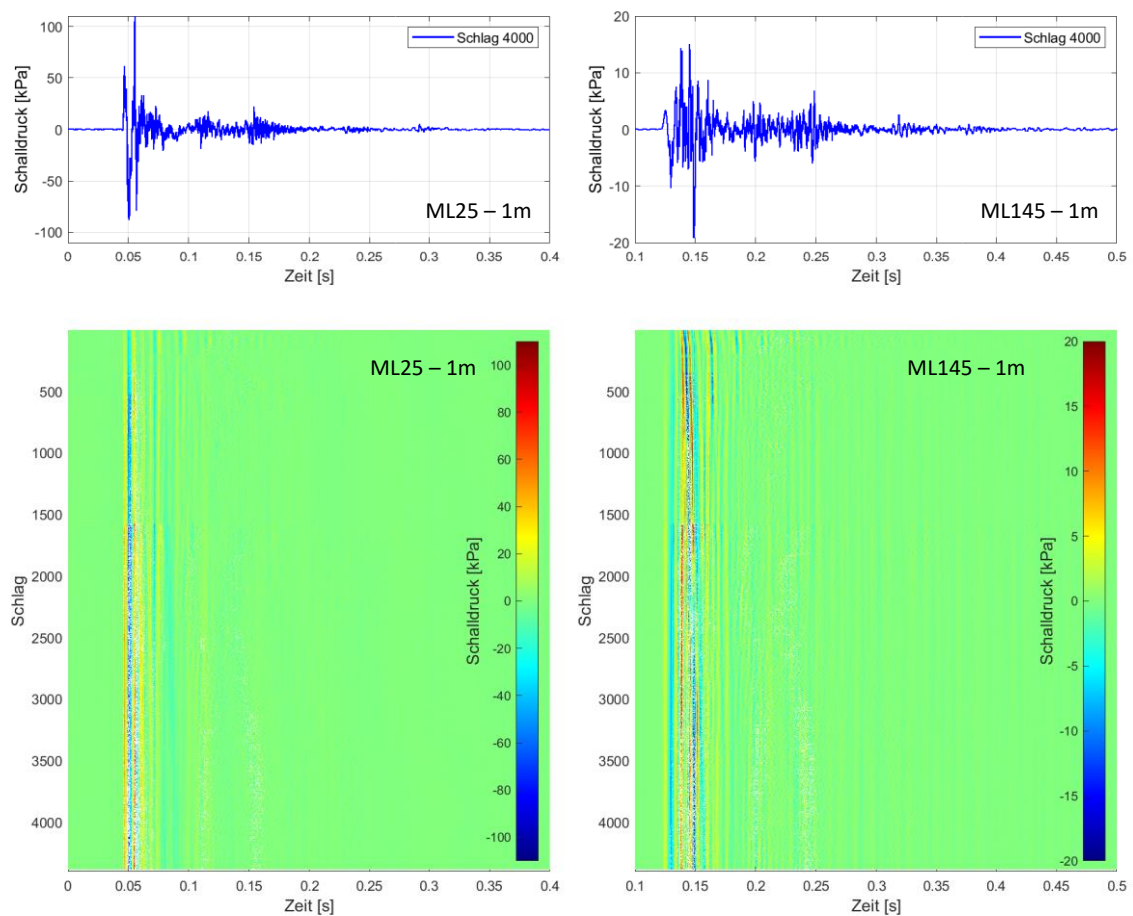


Bild 74: Hydroschallereignis aus Rammschlag 4.000 (oben) und über alle Rammschläge (unten) an ML25-1m (links) und ML145-1m (rechts) bei Pfahl 7

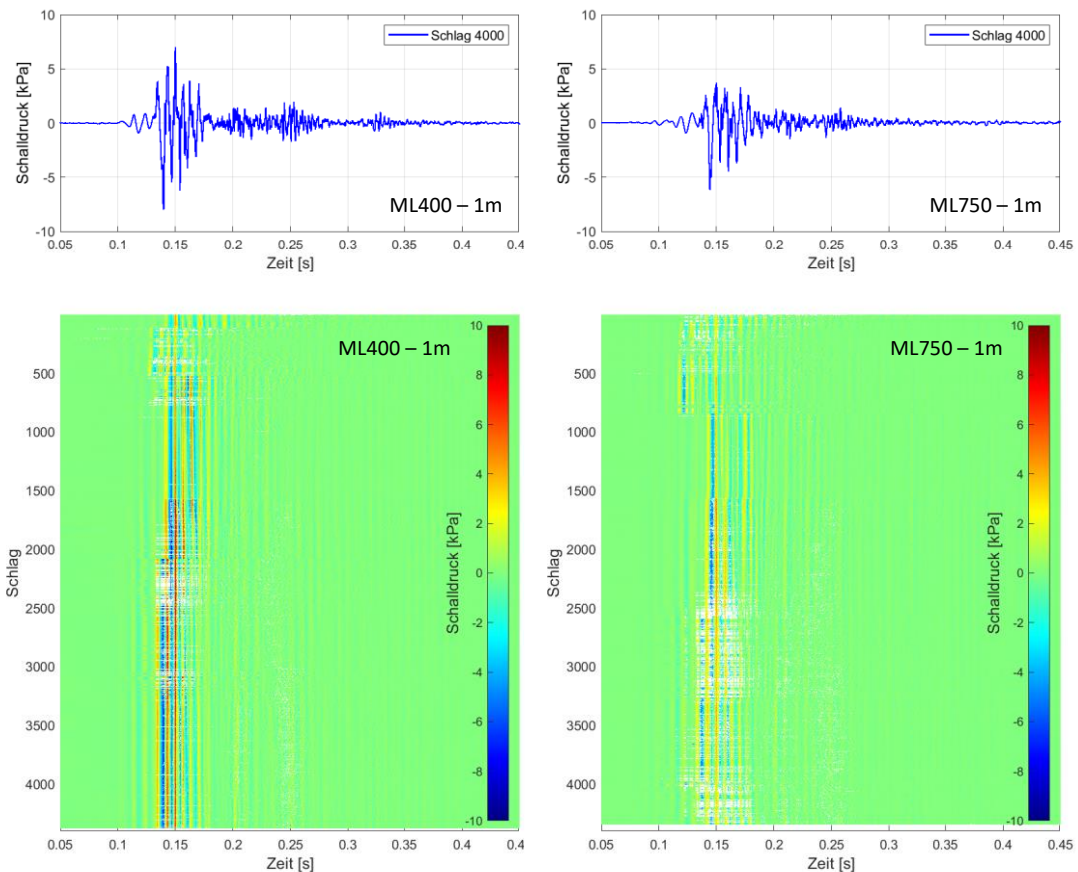


Bild 75: Hydroschallereignis aus Rammschlag 4.000 (oben) und über alle Rammschläge (unten) an ML400-1m (links) und ML750-1m (rechts) bei Pfahl 7

Auch in diesen Diagrammen belegt die vertikale Ausrichtung der gleichfarbigen Linien eine gleichmäßige Hydroschallausbreitung während der gesamten Installation. Auch aus diesen Analysen zeigt sich eine gleichbleibende Schlagdauer über die Entfernung. Der in Kapitel 2.4 (Bild 8) erwähnte Preblow beim ESRa-Test mit einer vergleichsweise tief-frequenten Schwingung vor dem hochfrequenten Rammimpuls zeigt sich erst in größerer Entfernung bei den ML400 und ML750 bei etwa 0,12 Sekunden. Im Nahbereich ist er nicht zu erkennen.

Das Ergebnis der Transformation der in Bild 72 dargestellten Signale vom Zeit- in den Frequenzbereich zeigt Bild 76. Grundsätzlich enthalten alle Signale Frequenzen zwischen 10 Hz und 5.000 Hz mit einem Hauptenergiebereich zwischen 50 Hz und 500 Hz. Der größte Ausschlag befindet sich bei etwa 140 Hz, sowie Peaks bei 90 Hz und 230 Hz. Während bei den ML25 und ML37 auch hohe Frequenzen von über 1.000 Hz im Signal vorhanden sind, nehmen diese infolge der geometrischen Ausbreitungsdämpfung und verhältnismäßig geringen Energie mit wachsender Entfernung ab. Dieser Effekt zeigt sich bereits ansatzweise in Bild 73.

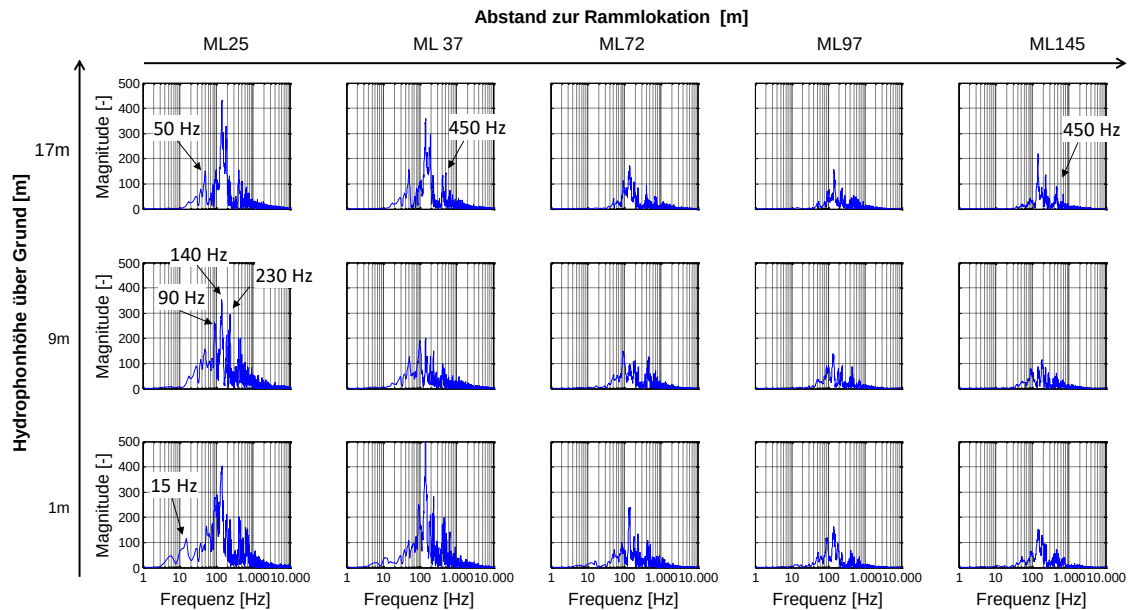


Bild 76: Frequenzanalysen der in Bild 72 gezeigten Schalldruckverläufe

Um das Bild der Hydroschallausbreitung weiter zu vervollständigen sind in Bild 77 für den gleichen Rammschlag der Schalldruckverlauf mit dazugehörigem Frequenzspektrum im Fernbereich bei ML400 und ML750 gezeigt.

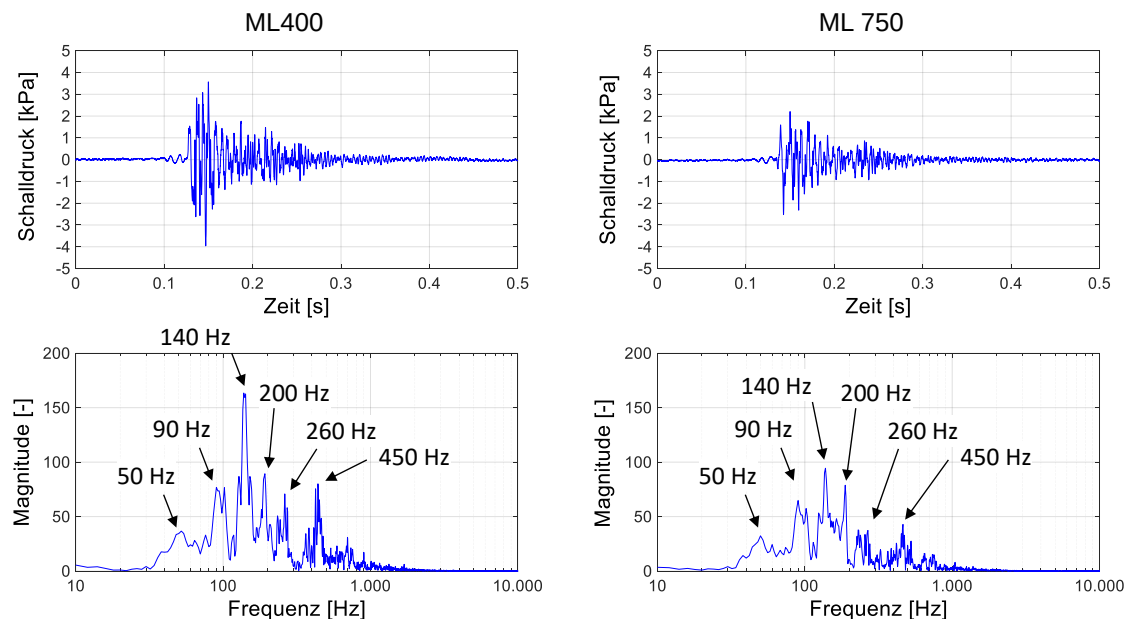


Bild 77: Zeitsignal der Schalldruckverläufe und daraus ermittelte Frequenzspektren des gleichen Rammschlages aus Bild 72 im Fernbereich

Der maximale Schalldruck reduziert sich weiter von 13 kPa bei ML145 auf 4 kPa bei ML400 sowie 2,5 kPa bei ML750 (jeweils 1 m über dem Meeresboden). Die Dauer des

Hydroschallsignales verkürzt sich von 250 ms an ML25 auf 150 ms bei ML750. Bei Betrachtung der Frequenzspektren und Vergleich mit denen des Nahbereiches ergeben sich große Ähnlichkeiten. Auch in größeren Entfernungen dominieren Frequenzen zwischen 90 Hz und 460

Die bis hier erläuterten Ergebnisse der Hydroschallausbreitung bei einer unbeeinflussten Pfahlrammung folgen klar den bisher bekannten Theorien und Effekten und können daher als plausibel angesehen werden. Da im Zuge der durchgeführten Messkampagnen im Gegensatz zu den standardisierten üblichen Messungen in 750 m und 1.500 m Entfernung, auch Messungen im Nahbereich und damit räumlich außerhalb des HSD-Systems aber gleichzeitig innerhalb des Blasenschleiers durchgeführt wurden, sollen auch diese Ergebnisse im Folgenden betrachtet werden.

8.4.3 Ermittlung von Pegelwerten

Bisher wurden die Ergebnisse der Hydroschallmessungen ausschließlich in ihrer Rohdatenform als Zeitreihen und schmalbandige Frequenzspektren analysiert. Zur Beurteilung der Schallminderungswirkung der eingesetzten Systeme ist die Ermittlung der Pegelwerte mittels der in Kap. 2.3 beschriebenen Formeln notwendig. Aus Sicht der Genehmigungsbehörde stellen der Einzelereignispegel SEL sowie der Spitzenpegel L_{Peak} in 750 m Entfernung bei der Beurteilung der Schallausbreitung sowie der Schallminderungsmaßnahmen die relevanten Größen dar. Diese werden separat für jeden aufgezeichneten Rammschlag und Sensor ermittelt.

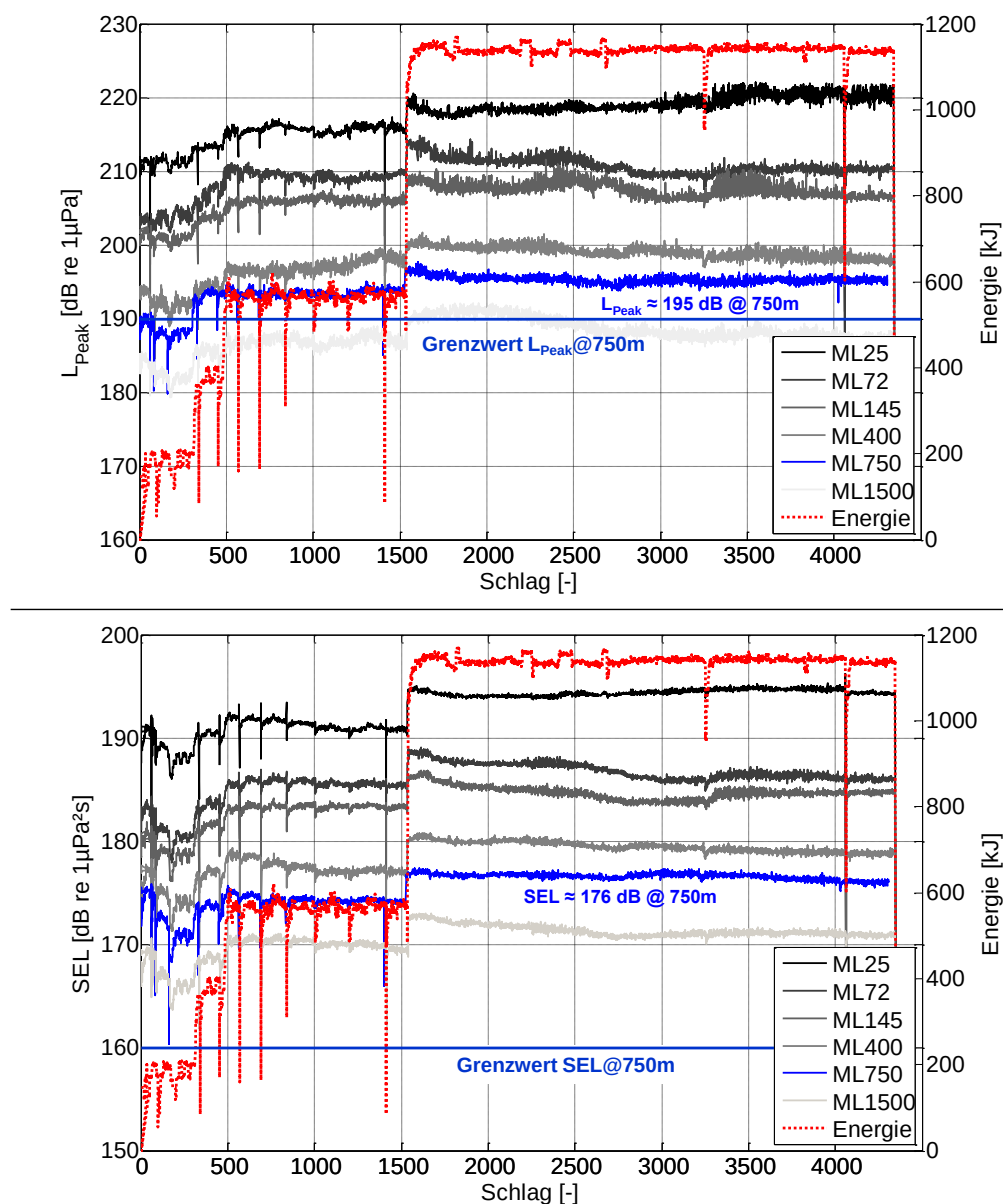


Bild 78: Spitzenpegel (L_{Peak} , oben), Einzelereignispegel (SEL, unten) und Rammenergie während der Rammung an verschiedenen ML beim Referenzpfahl ohne Schallminderung

In Bild 78 ist die Entwicklung des L_{Peak} und SEL über die Dauer der Rammung eines Pfahles an verschiedenen Messlokalationen in einem Meter über dem Meeresgrund in Form einer Einzelschlaganalyse aufgetragen und der linken Achse zugeordnet. Gleichzeitig visualisiert die rot gepunktete Linie (zugeordnet der rechten Achse) die aufgebraachte Rammenergie des Rammhammers. Das mehrfache insbesondere zu Beginn der Rammung entstehende plötzliche Abfallen (z.B. bei Schlag 450) der Rammenergie ist verfahrenstechnisch begründet. Zu Beginn jeder Rammung wird der kontinuierliche Rammprozess mehrfach unterbrochen, um die Vertikalität des Pfahles zu prüfen und ggfs. notwendige Korrekturen mit dem Pilegripper vornehmen zu können. Nach jeder dieser Ramppausen wird die Rammenergie erneut kontinuierlich erhöht, um den Rammhammer nicht zu beschädigen.

Grundsätzlich nehmen die Pegelwerte analog zu den bereits beschriebenen Amplituden der Schalldruckverläufe aus Bild 72 aufgrund der Ausbreitungsdämpfung mit wachsender Entfernung zum Pfahl ab. Gleichzeitig lassen sich sprunghafte Anstiege der Schall-emission infolge Erhöhung der Rammenergie feststellen. Eine Verdoppelung der Rammenergie bewirkt eine Erhöhung des SEL von etwa 3 dB. Innerhalb der Bereiche gleicher Rammenergie bleiben die Pegelwerte weitestgehend konstant.

Auffällig ist darüber hinaus, dass sich zu Beginn der Rammung bei konstanter Rammenergie beim SEL im Gegensatz zum Spitzenpegel zunächst höhere Pegelwerte ergeben, die bis etwa zum Schlag 200 abnehmen. Erst in der Folge verlaufen sie konstant und verhalten sich entsprechend der Rammenergie. Ein Erklärungsansatz dazu findet sich in Kapitel 8.6.1.

Der Pfahl in diesem Beispiel diene als Referenzmessung ohne Schallminderung und unbehinderter Schallausbreitung, weshalb die gemessenen Schallpegel in 750 m Entfernung den geforderten Grenzwert deutlich um etwa 16 dB (SEL) bzw. 5 dB (L_{Peak}) überschreiten. Die gemessenen Pegel liegen im Bereich der Erwartungen für die Rammung von Monopfählen mit einem Durchmesser von 6 m (Bild 26). Die Referenzmessung war notwendig, um im Rahmen dieser Arbeit eine Bewertung der Wirksamkeit der eingesetzten Schallminderungssysteme einzeln und in Kombination unter bestmöglich vergleichbaren Randbedingungen (Geologie, Wassertiefe, Pfahldurchmesser, Rammenergie) vornehmen zu können. Insgesamt waren bei diesem Pfahl 4.346 Rammschläge notwendig, um eine Einbindung von 29,75 m zu erzeugen.

Durch die hohe Dichte an Hydrophonen im Nahbereich ist es möglich, die Pegelentwicklungen über die Tiefe und Entfernung zur Schallquelle detailliert zu untersuchen. Diesen Zusammenhang zeigt Bild 79 als Ergebnis des Referenzpfahles in Form einer Schallkarte. Da sich der Einzelereignispegel bei gleichbleibender Rammenergie ebenfalls

weitestgehend konstant verhält (vgl. Bild 78) ist hier exemplarisch der Median des Einzelereignispegels aus 500 Schlägen mit maximaler Rammenergie dargestellt. Es wird deutlich, dass es in direkter Nähe zum Pfahl am lautesten ist und der Pegel mit wachsender Entfernung abnimmt. Darüber hinaus wird ein Pegelanstieg zum Meeresboden hin ersichtlich (Differenz zwischen 4 bis 6 dB), der aus der Bodenwelle sowie der Reflexion der Dehnwelle im Pfahl am Meeresboden resultieren kann. Dieser Zusammenhang konnte bei sämtlichen vermessenen Pfählen in dieser Form festgestellt werden. Die ML97 wurde bei dieser Darstellung nicht berücksichtigt, da die Messposition im Schallschatten eines Beines des Installationsschiffs lag (vgl. Bild 44).

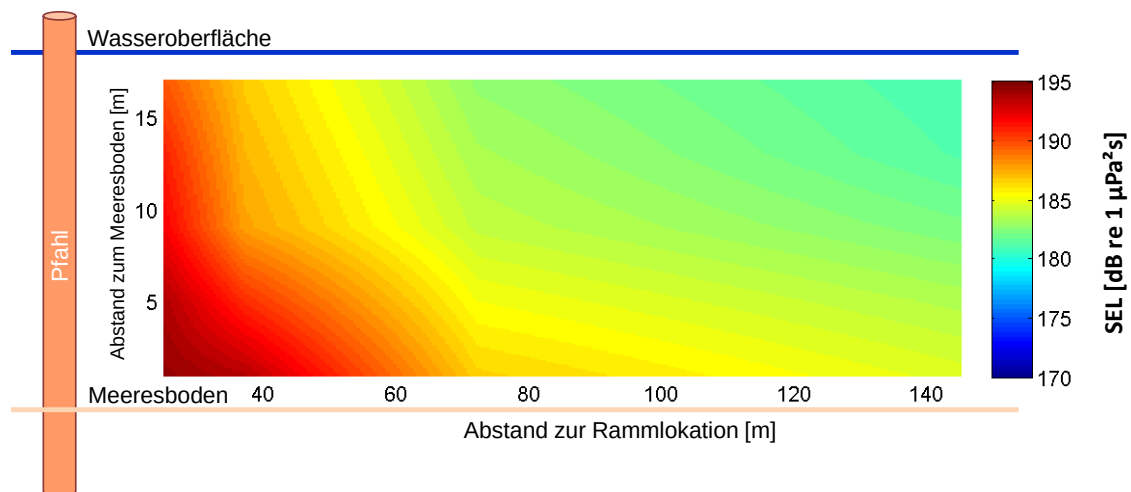


Bild 79: Schallkarte für den Einzelereignispegel (SEL) im Nahbereich zwischen 25 m und 145 m Entfernung beim Referenzpfahl

8.4.4 Empirischer Zusammenhang und Vergleichsberechnung

Eine große Herausforderung bei der Planung und Genehmigung von Offshore-Windparks besteht in der Prognose der absolut zu erwartenden Hydroschallpegel. Neben der Formel nach Thiele aus Kapitel 4.5 sind bisher keine empirisch ermittelten mathematischen Beziehungen veröffentlicht. Darüber hinaus lassen sich aus der Formel nach Thiele keine Absolutpegel ableiten, sondern lediglich die Pegelabnahme infolge der geometrischen Ausbreitungsdämpfung bestimmen. Eine Pegelprognose dagegen ist ansatzweise lediglich anhand der empirisch ermittelten Darstellung in Bild 26 anhand des Pfahldurchmessers möglich. Die Rammenergie sowie weitere Einflussfaktoren finden dabei jedoch keine Berücksichtigung.

Mit den in dieser Arbeit erhobenen Daten soll ein empirischer Ansatz entwickelt werden, durch den eine Prognose der Absolutwerte von SEL und L_{Peak} in Abhängigkeit der

Entfernung und erzeugten Rammenergie möglich ist. In Bild 80 sind die aus Bild 78 ermittelten mittleren Pegelwerte für die bei dieser Rammung dominierenden Energieplateaus bei 230 kJ, 360 kJ, 570 kJ und 1140 kJ Rammenergie an den dazugehörigen ML (Punkte) aufgetragen. Daraus ergibt sich der empirisch ermittelte, baustellenspezifische Ausbreitungsfaktor in Gleichung 4.21 zu $k = 12,7$. Die schraffierte Fläche in den beiden Diagrammen kennzeichnet die aus den Daten ermittelte logarithmierte Regressionsanalyse.

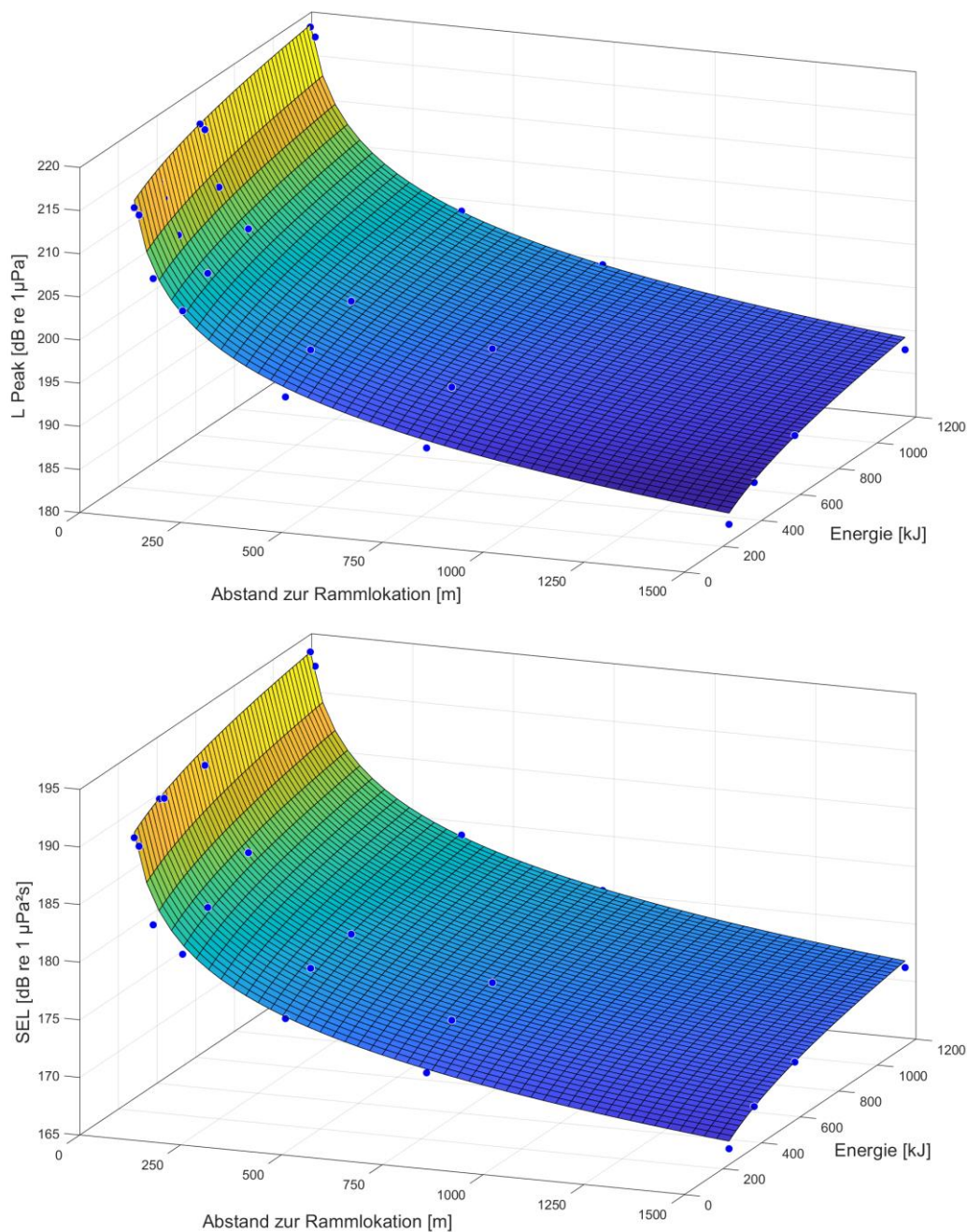


Bild 80: Messwerte und Abklingkurven des L_{peak} (oben) und SEL (unten) bei ungehinderter Schallausbreitung

Aus dieser lassen sich folgende mathematische Zusammenhänge für den SEL und L_{Peak} ableiten.

$$SEL = 187,3 - 5,297 \cdot \log(R) + 3,393 \cdot \log(E) \text{ [dB]} \quad (8.5)$$

$$L_{Peak} = 213,1 - 7,186 \cdot \log(R) + 4,206 \cdot \log(E) \text{ [dB]} \quad (8.6)$$

R Entfernung zur Schallquelle [m]
 E Rammenergie [kJ]

Diese Gleichungen können als Prognoseformeln zur Abschätzung der Hydroschallpegel verwendet werden. Es ist in diesem Zusammenhang angemerkt, dass sie explizit für die zu Grunde liegenden baustellenspezifischen Randbedingungen hinsichtlich Geologie, Wassertiefe, Pfahldurchmesser, Rammhammer etc. gelten. Inwieweit sie auf andere Standorte und Randbedingungen übertragbar sind, bleibt Gegenstand zukünftiger Forschungen und sollte durch weitere Messkampagnen untersucht werden.

Zur Validierung dieser Formeln sollen die Pegel für andere bereits ausgeführte Installationen in der Nordsee unter ähnlichen Randbedingungen Anwendung finden. In von Plein et al. (2022) sind im Rahmen des Baumonitorings bei verschiedenen Windparks ermittelte SEL-Pegelwerte während der Installation von Monopilegründungen bei ungehinderter Schallausbreitung aufgeführt. Darüber hinaus sind weitere Informationen und Randbedingungen zu den Messergebnissen bei den Windparks enthalten. Tabelle 14 zeigt einen Auszug der Windparkprojekte, deren Randbedingungen bestmöglich mit denen des Windparks *Amrumbank West* vergleichbar sind. Der darin aufgeführte Windpark *AW* steht vermutlich für *Amrumbank West*. Die Windparks *BU* (*Butendiek*) und *BR1* (*Borkum-Riffgrund 1*) haben ähnliche bzw. identische Pfahldurchmesser bei vergleichbaren Wassertiefen. Der wesentliche Unterschied zu diesen beiden Windparks besteht in einem anderen Hammertyp. Da in der Veröffentlichung ausschließlich SEL-Werte angegeben sind, werden diese mit den nach Gleichung 8.5 ermittelten Werten gegenübergestellt (rechte Spalte). Der Vergleich ergibt für *AW* eine Differenz von 0,4 dB, für *BU* von 1,7 dB und für *BR1* von 0 dB (rechte Spalte) und zeigt somit gute Übereinstimmungen mit anderen Projekten.

Tabelle 14: Vergleich der empirischen Formel mit Messwerten aus Monopileinstallationen (Auszug aus (von Plein, et al., 2022))

Windpark	Rammenergie [kJ]	Pfahldurchmesser [m]	Pfahllänge [m]	Wassertiefe [m]	Rammgewicht [t]	Hammertyp	Distanz zur Rammlokation [m]	gemessener SEL [dB re 1µPa²s]	SEL [dB re 1µPa²s] nach Gl. 8.5	Δ SEL [dB]
AW	1140	6	55	20	95	MHU 1900S	750	175,8	176,2	0,4
BU	740	6	53	20	100	Hydrohammer S2000	750	173	174,7	1,7
BR1	800	5,9	58	27	100	Hydrohammer S2000	738	175	175	0

8.4.5 Auswirkung der Schallminderungssysteme auf die Schallausbreitung

Aus der Referenzrammung ohne Schallminderungssystem zeigt sich, dass beim OWP Amrumbank West grundsätzlich eine Schallminderung von mindestens 16 dB (SEL) bzw. 5 dB (L_{Peak}) erbracht werden muss, um die Grenzwerte des BSH verlässlich einzuhalten.

Bei der Auslegung von Schallminderungssystemen ist zunächst eine vertiefte Betrachtung der Pegelentstehung notwendig. Bild 81 zeigt den Schalldruckverlauf für einen typischen Rammschlag (schwarz) und neben der Berechnung des L_{Peak} auch die zeitabhängige Entwicklung des SEL (rot). Der L_{Peak} Pegel bezieht sich auf die betragsmäßig größte Amplitude innerhalb des Rammschlages und ist damit nur von einem einzigen Wert abhängig. Beim SEL hingegen wird der Rammschlag in Gänze bewertet. Da es sich um einen energetischen Pegel handelt, werden sowohl die Amplituden jeder Schwingungsperiode als auch die Länge des Schlages berücksichtigt. Dieser mathematische Zusammenhang bewirkt, dass die Verläufe des SEL verglichen mit dem L_{Peak} deutlich weniger variieren.

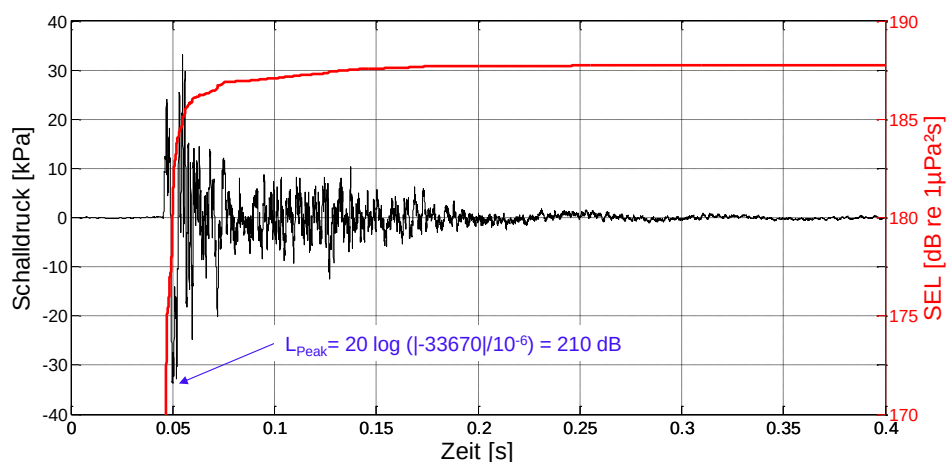


Bild 81: Schalldruckverlauf eines Rammschlages und daraus resultierender L_{Peak} sowie die zeitabhängige Entwicklung vom SEL

Deutlich wird, dass bereits 0,05 Sekunden nach Welleneinsatz (bei 0,09 Sekunden) etwa 99 % des resultierenden SEL-Pegels erreicht sind und die restlichen 0,15 Sekunden (bis 0,25 Sekunden) keine nennenswerte Erhöhung des Pegels bewirkt. Im Wesentlichen ist daraus zu folgern, dass eine Reduktion des Peak-Wertes den größten Effekt auf beide Schallpegel (SEL und L_{Peak}) besitzt. Gleichzeitig wirkt sich eine Verlängerung des Impulsdauer positiv aus, da damit ebenfalls eine Reduktion des Peak-Wertes einhergeht

(Elmer et al., 2007). Diese und auch andere Methoden wurden bereits in der Vergangenheit zur Optimierung von Schallminderungssystemen und Rammhämmern untersucht.

Analog zu Bild 78 sind in Bild 82 die Pegelentwicklungen des L_{Peak} und SEL während der Rammung eines Pfahles mit den Schallminderungssystemen DBBC, BBC (drei kreisförmige Große Blasenschleier) und HSD aufgetragen. Es ist anzumerken, dass DBBC und BBC in einem Radius von etwa 150 m vom Pfahl angeordnet sind und die Schallminderung dieser Systeme nur auf die gemessenen Pegel ab ML150 wirken (vgl. Bild 42). Das HSD-System kam aus Verfahrenstechnischen Gründen erst in Phase 2 der Pfahlinstallation zum Einsatz (vgl. Abschnitt 7.2).

Grundsätzlich finden sich hier die bereits bei Bild 78 erläuterten Zusammenhänge. In Phase 1 (bis etwa Schlag 1.600) kam ein doppelter Großer Blasenschleier (DBBC) in Verbindung mit einem einfachen Großen Blasenschleier (BBC) zum Einsatz. Die Pegelwerte der Messlokationen ML25 und ML145 befinden sich innerhalb des DBBC und BBC und sind deshalb in Phase 1 ähnlich hoch wie bei der Referenzmessung. Zwischen den Messlokationen ML145 und ML250 befinden sich der DBBC und BBC, weshalb die Pegelwerte außerhalb der Blasenschleier im Vergleich zur Referenzmessung bereits deutlich geringer sind. Der Grenzwert von 160 dB (SEL) in 750 m Entfernung wird erst zum Ende der Phase 1 knapp überschritten. In Phase 2 wurde das direkt am Pfahl befindliche HSD zusätzlich eingesetzt. Dies führt zu einer weiteren Schallminderung, die sich als Sprung zu geringeren Pegelwerten bei gleichbleibender Rammenergie zeigt. Zu erkennen ist, dass der Betrag der Schallminderung abnimmt. Während er bei der ML25 eine Pegelabnahme von etwa 10 dB sowohl beim L_{Peak} als auch SEL bewirkt, sind es bei der ML750 und ML1500 etwa 6 dB.

Insgesamt wurden beide Grenzwerte bei dieser Pfahlinstallation eingehalten. Im Vergleich zur Referenzmessung wurde bei maximaler Rammenergie der L_{Peak} um 23 dB und der SEL um 19 dB gemindert.

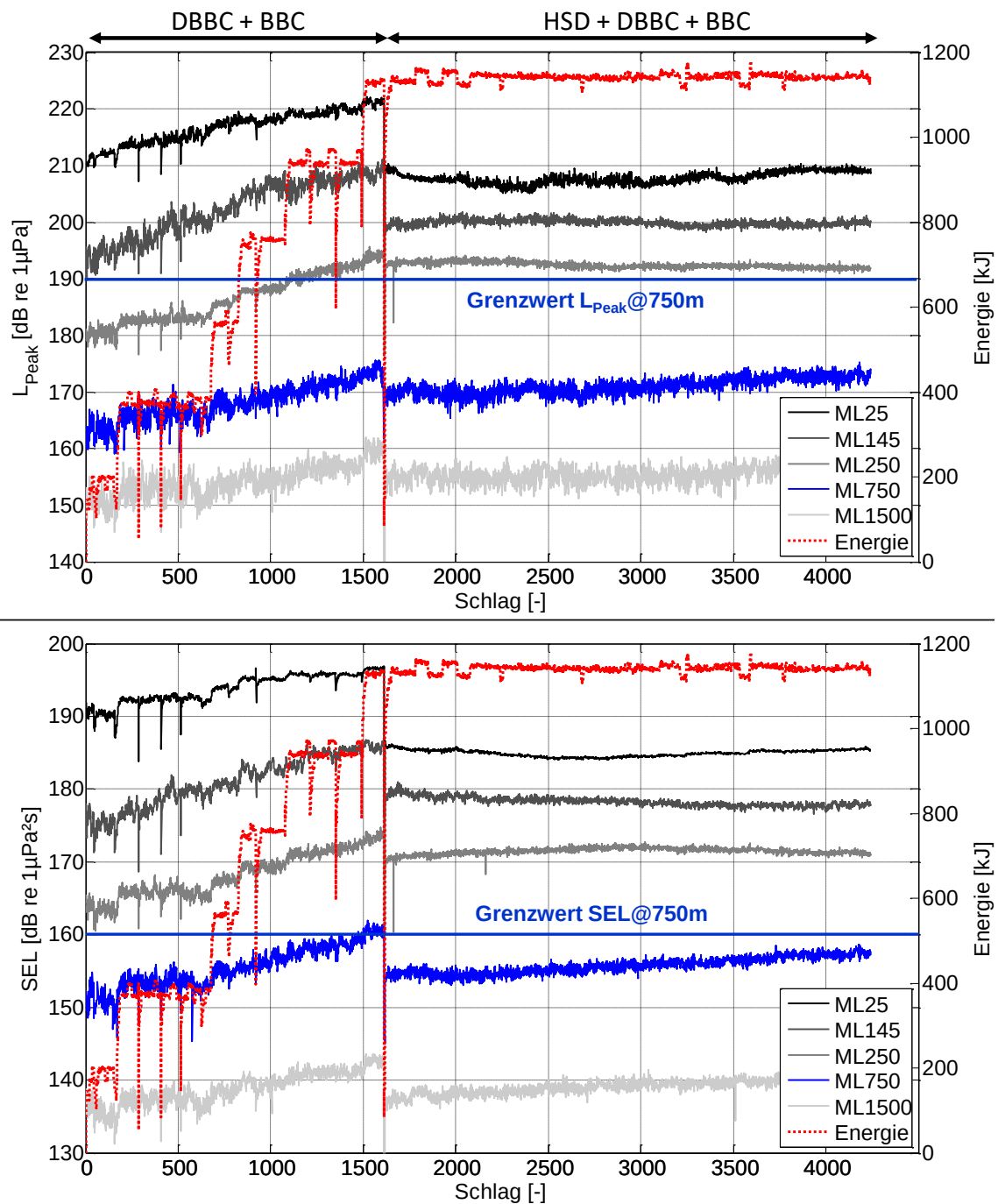


Bild 82: Spitzenpegel (L_{Peak} , oben), Einzelereignispegel (SEL, unten) und Rammenergie während der Rammung an verschiedenen ML bei Pfahl 3 mit Schallminderung

Neben der Bestimmung der Pegelwerte ist die frequenzabhängige Zusammensetzung der Schallsignale von großer Bedeutung, da diese auf die Hörorgane der Meerestiere direkten Einfluss haben. Darüber hinaus ist diese Form der Analyse hilfreich, um die Schallminderungssysteme zielgerichtet im gewünschten Frequenzbereich optimieren zu können. In Bild 83 sind die Ergebnisse von Terzanalysen während der Rammung ohne

(Referenz) und mit verschiedenen Schallminderungssystemen bei maximaler Rammenenergie in einer Tiefe von 1 m über Grund dargestellt (links oben das Referenzergebnis, rechts oben ausschließlich ein BBC, links unten ausschließlich HSD und rechts unten mit beiden Systemen, BBC und HSD). Die unterschiedlich farbigen Linien markieren die Entfernung zum Pfahl.

Grundsätzlich tritt unter den vorliegenden Randbedingungen die größte Energie der ungeminderten Schallamplitude im Frequenzbereich zwischen 80 Hz und 200 Hz auf. Auf diesem Bereich sollte bei der Auslegung der Schallminderungssysteme der Fokus liegen, da sich eine Schallminderung überdurchschnittlich auf den SEL auswirkt. Oberhalb und unterhalb dieser Frequenzen nimmt der Schallpegel kontinuierlich ab. Es zeigt sich die geometrische Dämpfung mit zunehmendem Abstand zum Pfahl über das gesamte Frequenzband. Eine stärkere Dämpfung kann in den tiefen Frequenzen unter 50 Hz sowie in den hohen Frequenzen über 1 kHz festgestellt werden.

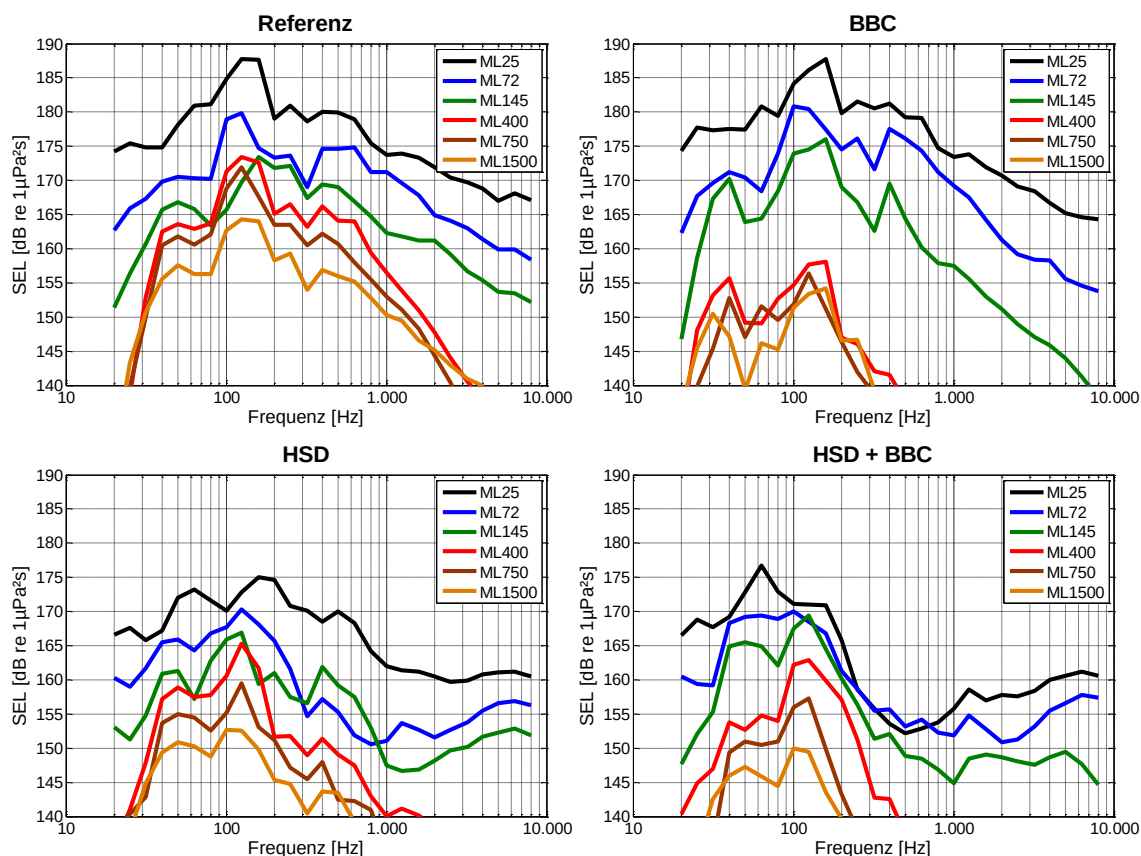


Bild 83: Terzanalyse an verschiedenen ML bei Einsatz ohne und mit verschiedenen Konfigurationen von Schallminderungssystemen

Der Abfall der Amplitude im niederfrequenten Bereich lässt sich auf die untere Grenzfrequenz bei der Schallausbreitung im Wasser zurückführen, welche sich nach Bild 21 für

die Randbedingungen beim OWP *Amrumbank West* zu etwa 40 Hz ergibt. Schallwellen unterhalb dieser Frequenz können sich in der Wassersäule nicht stabil ausbilden und werden daher überproportional gedämpft. Der Abfall im oberen Frequenzbereich lässt sich auf die allgemeine Frequenzabhängigkeit der geometrischen Dämpfung zurückführen, nach der kurze Wellenlängen stärker gedämpft werden als lange (Betkhovskikh et al., 2003). Ab einer Entfernung von etwa 400 m bildet sich dann ein für die Rammung von Monopfählen typisches Frequenzspektrum mit einem vorwiegenden Energieanteil im Frequenzbereich zwischen 100 Hz bis 600 Hz aus, welches in Abhängigkeit der Einflussgrößen Wassertiefe, Pfahldurchmesser, Schlagramme, Rammenergie, Geologie etc. variieren kann.

Darüber hinaus zeigen sich beim Vergleich der vier Diagramme die Effekte und Wirkungsbereiche der unterschiedlichen Schallminderungssysteme einzeln und in ihrer Kombination.

Der Große Blasenschleier (Bild 83, oben rechts) befindet sich zwischen den ML145 und ML400 und verursacht dadurch eine deutliche Pegelminderung zwischen der grünen und roten Linie. Gleichzeitig stimmen die Pegelwerte innerhalb des Blasenschleiers bei ML25, ML72 und ML145 sehr gut mit denen der Referenzmessung überein, da hier eine vergleichbare, unbeeinflusste Schallausbreitung vorliegt.

Im Gegensatz dazu zeigt sich infolge des Einsatzes des HSD-Systems (Bild 83, unten links) direkt am Pfahl eine Schallminderung ab der ersten Messlokation ML25.

Während der Blasenschleier aufgrund der geringen maximalen Luftblasengröße von 1 cm bis 2 cm (vgl. Bild 31) hauptsächlich Frequenzen über 300 Hz effektiv abmindert, wirkt das HSD-System aufgrund der kontrollierbaren Blasengröße direkt am Pfahl vorwiegend im Frequenzbereich zwischen 60 Hz und 1000 Hz.

Das Diagramm unten rechts zeigt den kombinierten Einsatz von HSD und BBC zusammen. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsbereiche ergänzen sie sich sehr gut und sorgen für eine breitbandige Schallminderung über den gesamten Frequenzbereich. Die Dämpfung durch das HSD-System ist an allen Messlokalen zu erkennen, in den höheren Frequenzen ergibt sich eine zusätzliche Dämpfung hinter der ML145 durch den BBC.

Aufgrund der zahlreichen Messungen bei Einsatz unterschiedlicher Konfigurationen von Schallminderungssystemen lassen sich die Schallminderungswirkungen für jeden Fall separat analysieren. Tabelle 15 zeigt eine Zusammenstellung für die im Fernbereich für die Genehmigungsbehörden relevante Messposition an der ML750 ermittelten

charakteristischen Werte des SEL, jeweils als Median des SEL bei einer maximaler Rammenergie von 1140 kJ. Die gleiche Analyse jedoch für den L_{Peak} gibt Tabelle 16 wieder.

Tabelle 15: Zusammenstellung gemessener SEL bei ML750 bei 1.140 kJ

Schallminderungs-system	SEL [dB re 1 μ Pa ² s]	Mittelwert [dB]	Δ SEL [dB]
Referenz	176,2	176,2	-
BBC	167,9	167,9	8,3
HSD	164,5	164,5	11,7
HSD + BBC	160,3	161,2	15,0
	161,3		
	162,0		
HSD + BBC + DBBC	156,4	156,6	19,8
	156,4		

Tabelle 16: Zusammenstellung gemessener L_{Peak} bei ML750 bei 1.140 kJ

Schallminderungs-system	L_{Peak} [dB re 1 μ Pa]	Mittelwert [dB]	Δ L_{Peak} [dB]
Referenz	195,4	195,4	-
BBC	189,3	189,3	6,1
HSD	182,2	182,2	13,2
HSD + BBC	174,5	175,7	19,7
	177,2		
	175,3		
HSD + BBC + DBBC	172,3	171,6	23,8
	170,9		

Die Referenzpegel sind bereits aus Bild 78 bekannt. Die weiteren Absolutpegel wurden während der Rammungen mit den angegebenen Schallminderungssystemen ermittelt. Für die Kombination von mehreren Schallminderungssystemen wurden im Rahmen der Messkampagnen mehrere Installationen begleitet, weshalb hier mehrere Werte aufgeführt sind. Für jede zum Einsatz gekommene Systemvariante wurde der Mittelwert gebildet und dieser mit dem Referenzwert verrechnet. Das Ergebnis ist jeweils die rechte Spalte mit Angabe des Differenzwertes, welcher das Schalldämmmaß beschreibt.

Die Messungen ergeben für den Einzeleinsatz von HSD und BBC Schallminderungs-
werte von 8 dB bzw. knapp 12 dB für den SEL. Die Kombination beider Systeme erhöht
das Schalldämmmaß auf 15 dB. Bei weiterem zusätzlichem Einsatz eines DBBC konnte
die Schallminderung auf knapp 20 dB gesteigert werden. Die Minderung des L_{Peak} liegt
jeweils etwas höher als die des SEL.

8.5 Bodendynamik

Neben den Hydroschallmessungen im Wasserkörper wurden an jeder Messlokation Erschütterungsmessungen auf der Meeresbodenoberfläche mittels Geophonen durchgeführt, um die Bodenschwingungen zu erfassen. Diese sind von besonderem Interesse, um einen möglichen Einfluss der sich im Meeresboden ausbreitenden Wellen auf die Schallausbreitung im Wasser zu untersuchen. Auf ein im Wasser auf dem Meeresboden positioniertes Geophon wirken neben den Schwingungen des Meeresbodens auch Bewegungen der Wasserteilchen. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang die sich ausbreitende Hydroschallwelle infolge eines Rammschlags zu erwähnen, wie bereits Bild 8 zeigt, aber auch die Gezeitenströmung sowie Wellendünung (Swell) können Einfluss auf die Messungen haben. Neben den natürlichen spielen auch konstruktive Randbedingungen wie Bauform und Geometrie, Masse bzw. Ballastierung und damit Ankopplung eine wesentliche Rolle. Jedes Messgerät weist aufgrund seiner Eigenschaften eine spezifische Übertragungsfunktion auf, die bestenfalls auf die jeweilige Aufgabenstellung abgestimmt sind.

Die genannten Anmerkungen gestalten die Ausführung von Unterwassererschütterungsmessungen deutlich anspruchsvoller als beispielsweise Hydroschallmessungen und müssen bei der Analyse und Interpretation berücksichtigt werden. Veranschaulicht werden soll dies anhand der in Bild 84 gezeigten Signale. Dargestellt sind zwei Einzelschläge der vertikalen Schwingungsverläufe des gleichen Geophons derselben Pfahlrammung, bei der nur das HSD als Schallminderungssystem in Phase 2 zum Einsatz kam. Der obere Verlauf zeigt einen Rammschlag ohne (kurz vor Einsatz des HSD), der untere Verlauf einen der ersten Rammschläge mit dem HSD-System. Während die Bodenwelle (rote Kreise) in beiden Verläufen nahezu identisch verläuft, ergibt sich bei der Hydroschallwelle (blaue Kreise) eine deutliche Amplitudenreduzierung infolge des Schallminderungssystems. Dies verdeutlicht die zuvor beschriebenen Zusammenhänge aus Bauform und Masse. Aufgrund von Geometrie und Masse der Geophone auf der Meeresbodenoberfläche innerhalb des Wassers, wird auch die Hydroschallwelle vom Geschwindigkeitssensor registriert und nicht nur die Bodenwelle. Optimalerweise sollten für vergleichende Untersuchungen deshalb typengleiche Messgeräte verwendet werden. In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Analyse der bodendynamischen Vorgänge. Deshalb ist es notwendig, bei den folgenden Auswertungen den Einfluss der Hydroschallwelle zu eliminieren.

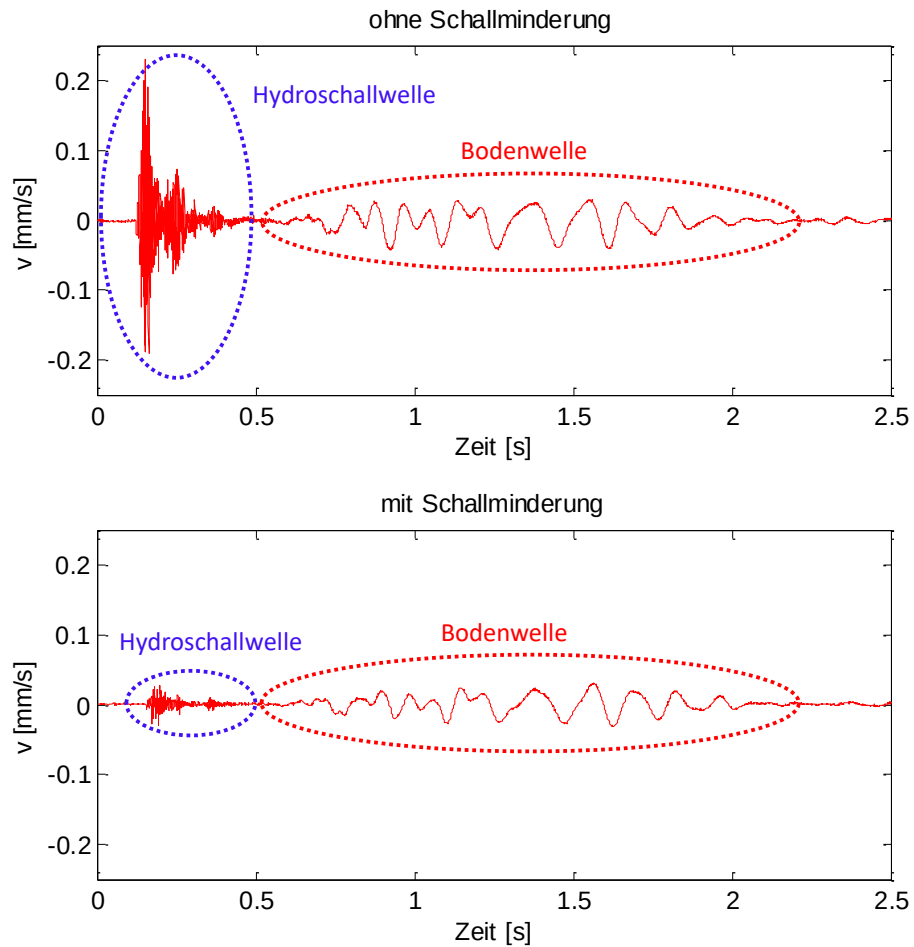


Bild 84: Signal der vertikalen Schwingungsrichtung des Geophons am ML150 eines Ramm-
schlages mit (oben) und ohne Schallminderung (unten) bei derselben Pfahlrammung

8.5.1 Analyse im Zeit- und Frequenzbereich

Auch zu dieser Thematik wird zunächst die Charakteristik der durch einen einzelnen Rammimpuls ausgelösten Erschütterungsereignisse im Zeitbereich getrennt nach den drei Koordinatenrichtungen betrachtet. In Bild 85 sind die Ergebnisse eines der ersten Schläge der Rammung des Monopiles ohne Schallminderung in den drei Koordinatenrichtung in drei unterschiedlichen Entfernungen dargestellt.

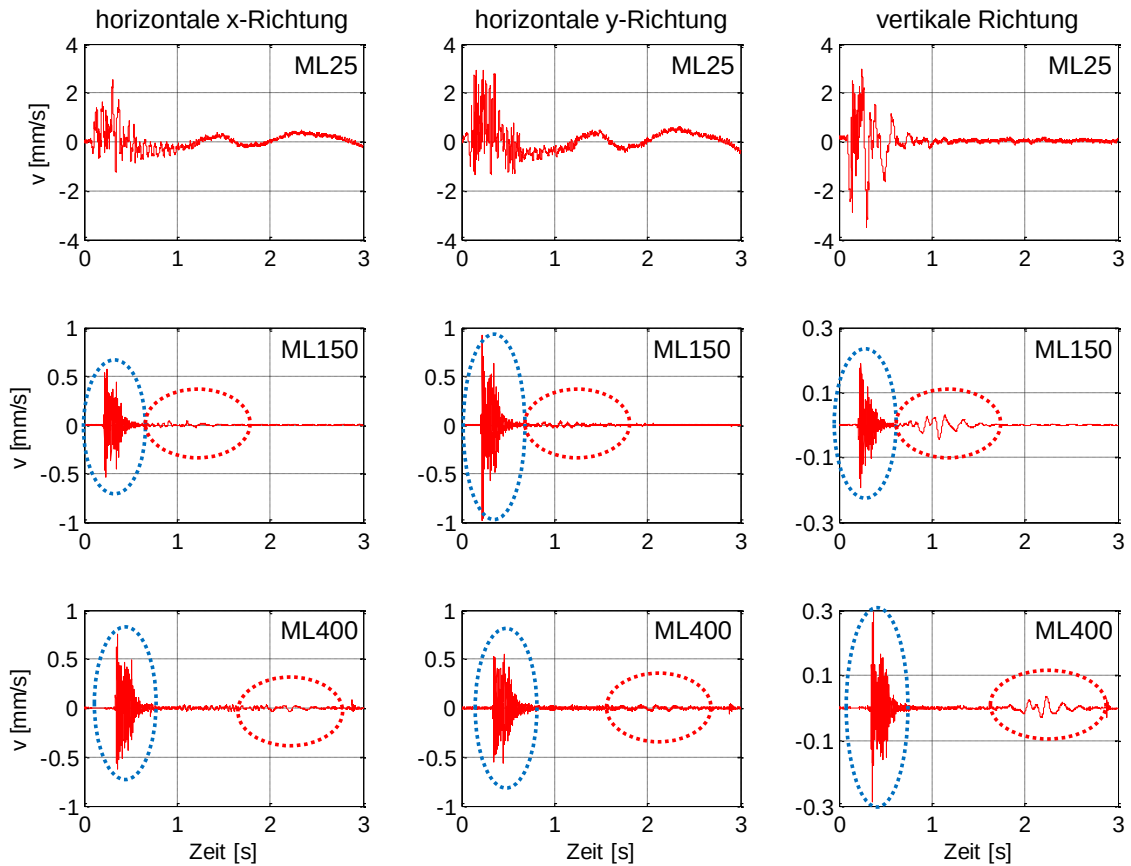


Bild 85: typischer Erschütterungsverlauf eines Rammschlages in den drei Koordinatenrichtungen über die Entfernung zum Pfahl ohne Schallminderung

Analog zu Bild 84 sind im gemessenen Signal der Geophone in allen drei Koordinatenrichtungen die hochfrequente Hydroschallwelle (blauer Kreis) und die tieffrequente Welle im Boden (roter Kreis) gut zu erkennen. Die Wellen breiten sich offensichtlich in den beiden Medien Wasser und Boden mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten aus, da sich deren zeitlicher Versatz mit wachsender Entfernung stetig vergrößert. In den Signalen der ML25 überlagern sich die beiden Wellen im Wasser und Boden aufgrund der sehr geringen Distanz zum Pfahl. Je größer die Entfernung zum Pfahl, umso eindeutiger sind die Wellen visuell voneinander zu unterscheiden. Anhand der aus der CTD-Sonden-Messung (Bild 54) bekannten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Wasser bei diesem Pfahl von 1.508 m/s lässt sich aus der zeitlichen Differenz zwischen der Hydroschallwelle zur Bodenschwingung die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Bodenwelle mit etwa 250 – 260 m/s errechnen. Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass es sich bei der detektierten Wellenart um die Oberflächenwelle (vgl. Abschnitt 4.1) handelt.

Auffällig ist zudem, dass die vom Geophon gemessenen Amplituden infolge Anregung durch die Hydroschallwelle in den horizontalen Richtungen im Fernbereich deutlich größere Amplituden haben, als in vertikaler Richtung, was wiederum auf die radiale Ausbreitungsrichtung dieser Welle zurückzuführen ist. Gleichzeitig nehmen die Maximalamplituden sowohl der Hydroschall- als auch Bodenwelle mit wachsender Entfernung ab.

An der Gewichtsplatte des Geophons bei der ML25 war eine Kamera appliziert, mit der nachgewiesen werden konnte, dass der Meeresboden eben ist und die Lage und Orientierung des Geophons während der Rammung stabil blieb (Bild 46). Folglich kann die Orientierung der vertikalen Messachse als bekannt angenommen werden. Die Ausrichtung der horizontalen Messrichtungen dagegen kann unter Wasser nicht definiert bestimmt bzw. kontrolliert erfolgen. Sie sind demzufolge unbekannt und unterscheiden sich von ML zu ML unterschiedlich.

Aus diesem Grund liegt der Fokus der folgenden Analysen auf der vertikalen Messrichtung. Des Weiteren kann aufgrund der Sensoranordnung auf der Meeresbodenoberfläche davon ausgegangen werden, dass im Wesentlichen Schwingungsverläufe der Oberflächenwellen erfasst werden. Der Einfluss der Raumwellen (Kompressions- und Scherwellen) ist dagegen nur schwer abzuschätzen.

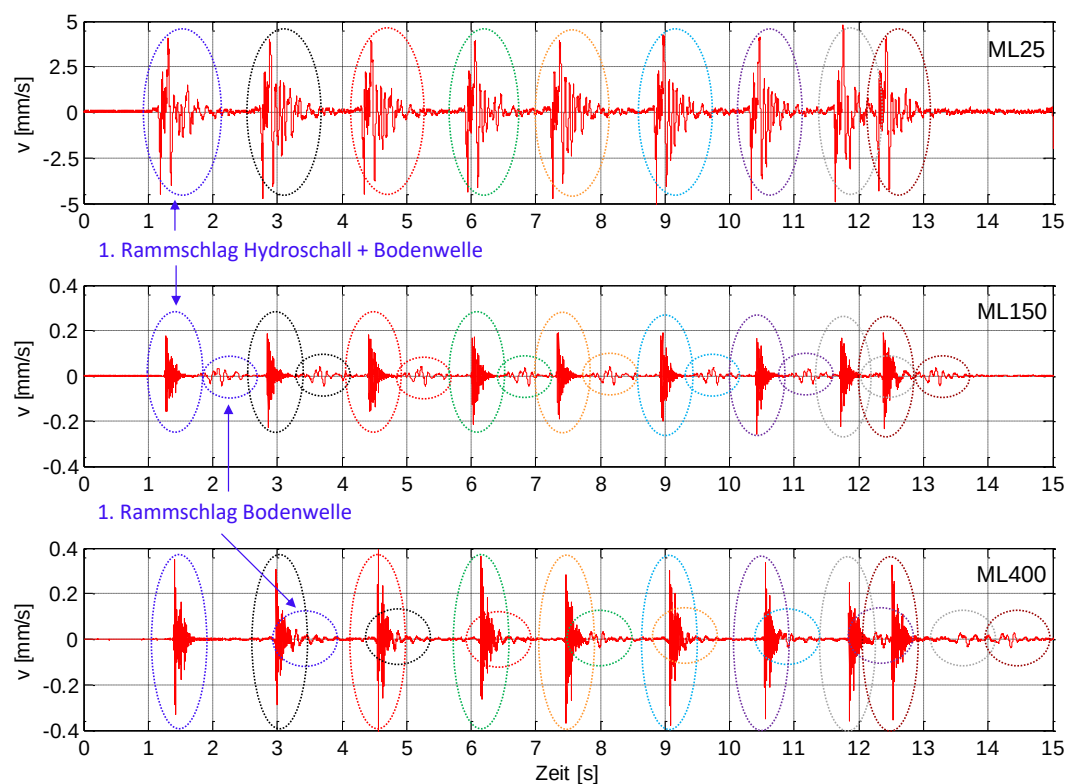


Bild 86: Erschütterungsverlauf einer Rammserie in der vertikalen Koordinatenrichtung über die Entfernung zum Pfahl ohne Schallminderung

Für die weiteren Analysen ist es zunächst von Bedeutung den zeitlichen Zusammenhang der Hydroschall- und Bodenwelle vertieft zu betrachten, da die Rammung nicht aus Einzelschlägen (nur beim Softstart) mit ausreichend großen Schlagpausen besteht, sondern aus Rammserien mit im Mittel etwa 40 Schlägen pro Minute. Bei der Analyse der Messungen am Pfahl und im Wasser haben die einzelnen Rammimpulse eine Dauer von maximal 300 ms (Bild 61, Bild 72), weshalb es möglich ist, die Schläge einzeln zu separieren und auszuwerten. Dies ist bei den Geophondaten lediglich bis zu einer Entfernung von etwa 100 m möglich, wie Bild 86 verdeutlicht. Dargestellt sind die vertikalen Erschütterungsverläufe einer Rammserie mit neun aufeinanderfolgenden Rammschlägen für die Entfernungen ML25, L150 und ML400. Die Rammschläge bestehend aus Hydroschall- und Bodenwelle sind durch farbige Kreise markiert und einander zugeordnet. Während bei der ML25 und ML150 beide Wellen den Sensor passiert haben, bevor der nächste Rammschlag erfolgt, ist diese Differenzierung bei der ML400 nicht mehr möglich. Die Bodenwelle des 1. Rammschlages (blaue kleine Kreise) überlagert sich aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei der ML400 mit der Hydroschallwelle des 2. Rammschlages (schwarze große Kreise). Dies ist bei den darauffolgenden Rammschlägen auf gleiche Weise der Fall. Die letzten beiden Rammschläge bei 11,8 s und 12,5 s haben eine noch kürzere Zeit zwischen den Schlägen, weshalb es hier bereits bei der ML25 zu Überlagerungen kommt.

Dieses Ergebnis macht eine Anpassung des bisher zu Anwendung gekommenen automatischen Auswertalgorithmus zur Detektion der Einzelschläge notwendig, da durch die Überlagerung der Wellen eine eindeutige Zuordnung zu den Rammschlägen nicht mehr gegeben ist. Dazu wird die zeitlich frequenzielle Zusammensetzung des Geophonsignals dahingehen untersucht, ob und wie eine Unterscheidung der Hydroschall- zur Bodenwelle möglich ist.

Die Ergebnisse dieser Analyse zeigt Bild 87. Oben sind die Zeitverläufe der vertikalen Bodenschwingung und unten die daraus errechneten Zeit-Frequenz-Spektren abgebildet. Der Vorteil dieser Art der Analyse im Gegensatz zur Fast-Fourier-Transformation ist die Gegenüberstellung des zeitlichen Schwingungsverlaufes und gleichzeitige deren frequenziellen Inhalte. Deutlich wird insbesondere anhand der ML150 und ML400, dass analog zur Hydroschallmessung mittels Hydrophon im Wasser die vom Geophon ermittelte Hydroschallwelle dominierende Frequenzanteile zwischen 40 Hz und 900 Hz beinhaltet, während sich die Bodenschwingung tieffrequenter zwischen 5 Hz bis 40 Hz bewegt. Dieses Ergebnis deutet sich bereits ebenfalls in Bild 76 und Bild 77 an. Im Nahbereich bei der ML25 ist diese klare Trennung nicht eindeutig gegeben, da sich hier die beiden Wellen in den Geophonmessungen zum einen überlagern, aber auch aus Bild 76

deutlich wird, dass tieffrequente Schwingungen bis 15 Hz vom Hydrophon bei 1 m im Wasser erfasst werden.

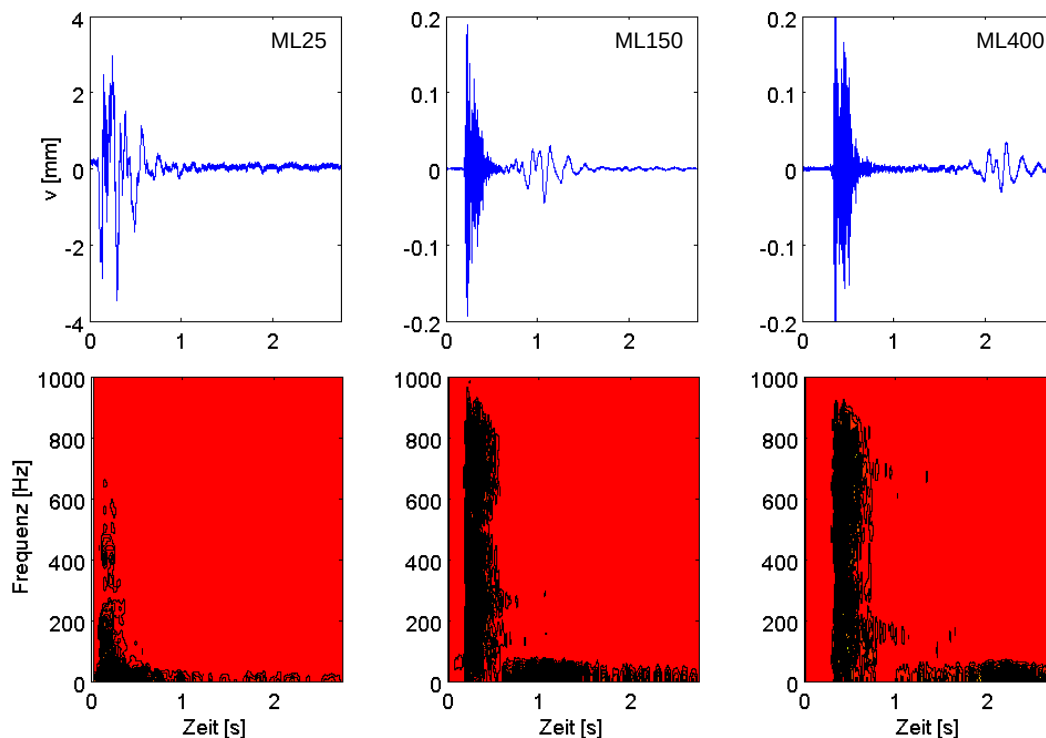


Bild 87: Zeitverläufe (oben) und deren Zeit-Frequenz-Spektren (unten) der vertikalen Bodenschwingungen

Aufgrund dieses Ergebnisses werden weitere Hilfsmittel der digitalen Signalverarbeitung notwendig und auf die Rohdaten der vertikalen Bodenschwingungen angewandt, um ausschließlich die Bodenschwingung ohne den Hydroschallanteil analysieren zu können. Dazu werden die Daten einer Tief- und Hochpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von $f_G = 40$ Hz unterzogen. Eine Tiefpassfilterung an einem Signal bewirkt, dass sämtliche Signalanteile unterhalb einer definierten Grenzfrequenz die Filterfunktion passieren und im Ergebnis erhalten bleiben und die Signalanteile oberhalb der Grenzfrequenz herausgefiltert und damit eliminiert werden. Die Hochpassfilterung erzeugt das Gegenteil, die Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz bleiben erhalten.

Das Ergebnis dieser Signalfilterung ist exemplarisch in Bild 88 und Bild 89 für einen Einzelschlag an der ML25 und ML145 dargestellt. Oben in den Darstellungen ist das ungefilterte Rohsignal (links) sowie deren FFT (rechts) gezeigt. Darunter folgt das tiefpassgefilterte Signal und FFT sowie hochpassgefilterte Signal und FFT.

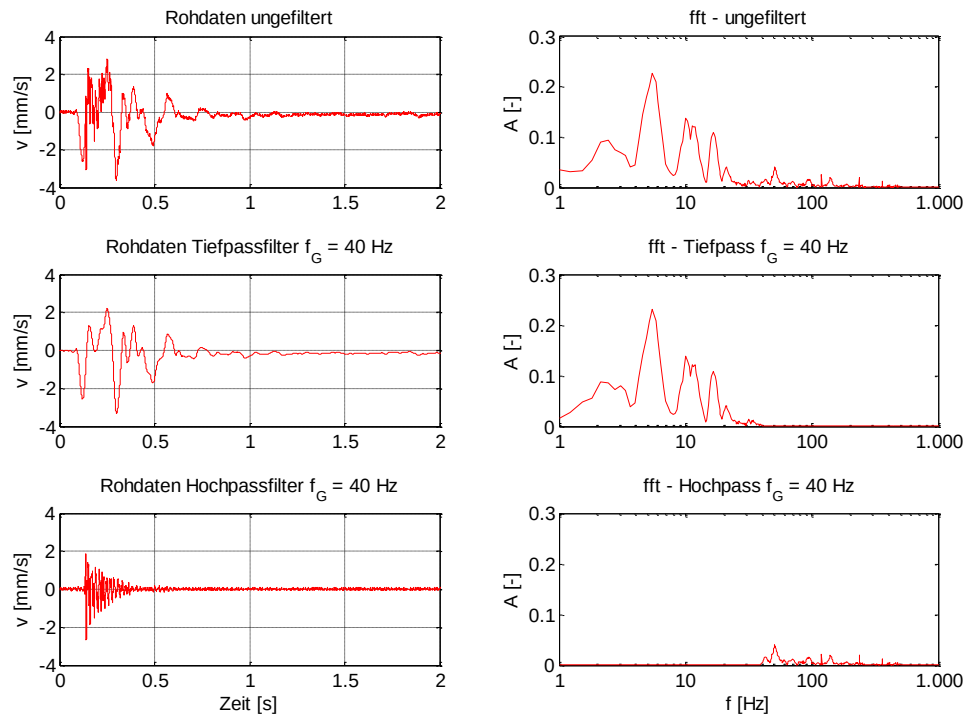


Bild 88: Auswirkung der Hoch- und Tiefpassfilterung in Bezug zum Rohsignal für ML25

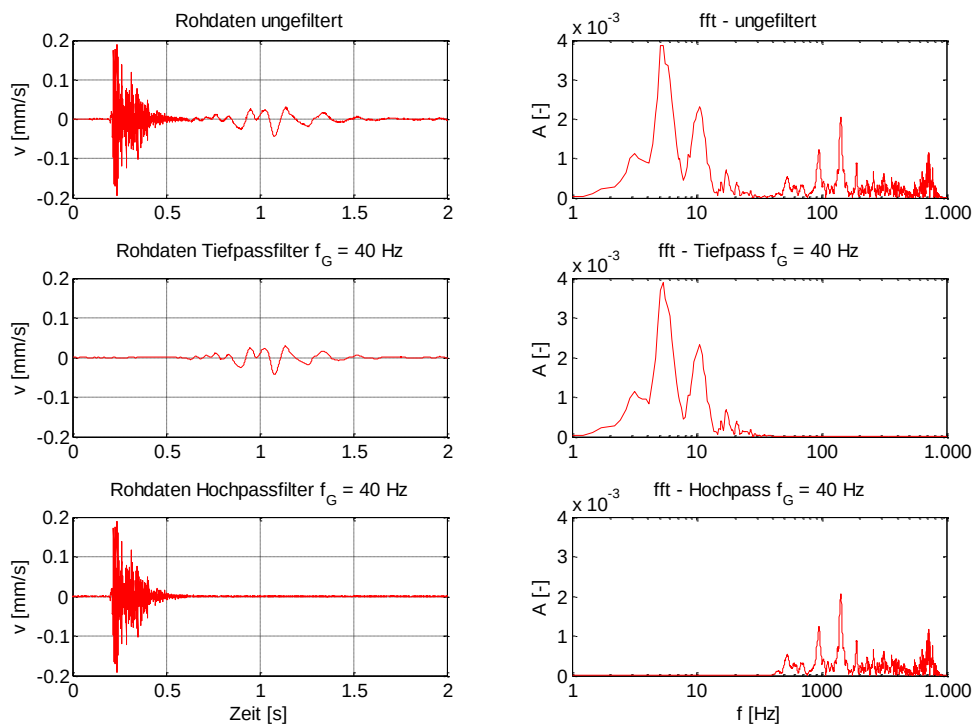


Bild 89: Auswirkung der Hoch- und Tiefpassfilterung in Bezug zum Rohsignal für ML145

Es wird deutlich, dass auf diese Weise die beiden Signalanteile aus Hydroschall- und Bodenwelle sehr gut trennbar sind und es zu keinen signifikanten Signalverfälschungen hinsichtlich der Amplitude kommt. Auch die Ergebnisse der FFT zeigen sehr gute Übereinstimmungen in Bezug auf die ungefilterten Rohdaten.

Da in diesem Abschnitt der Fokus auf der Bodenwelle liegt, werden für die weiteren Auswertungen der Geophondaten ausschließlich die tiefpassgefilterten Daten verwendet. Bild 90 zeigt in einer Gegenüberstellung das Ergebnis des Medians der Frequenzanalyse aller Rammschläge dieser Installation in unterschiedlichen Entfernungen. Die Bodenwelle wird von Schwingungen mit Frequenzen bei 5 bis 7 Hz sowie 12 bis 15 Hz dominiert. Diese sind auch in großer Entfernung bis zur ML250 zu registrieren. Bei der ML800 ist die 12 bis 15 Hz Schwingung so stark gedämpft, dass sie nicht mehr im Signal vorhanden ist, sondern nur noch die 7 Hz Schwingung. In geringer Distanz zum Pfahl bei der ML25 zeigt sich zudem ein Peak bei etwa 28 Hz, der jedoch bereits ab der ML72 nicht mehr sichtbar ist.

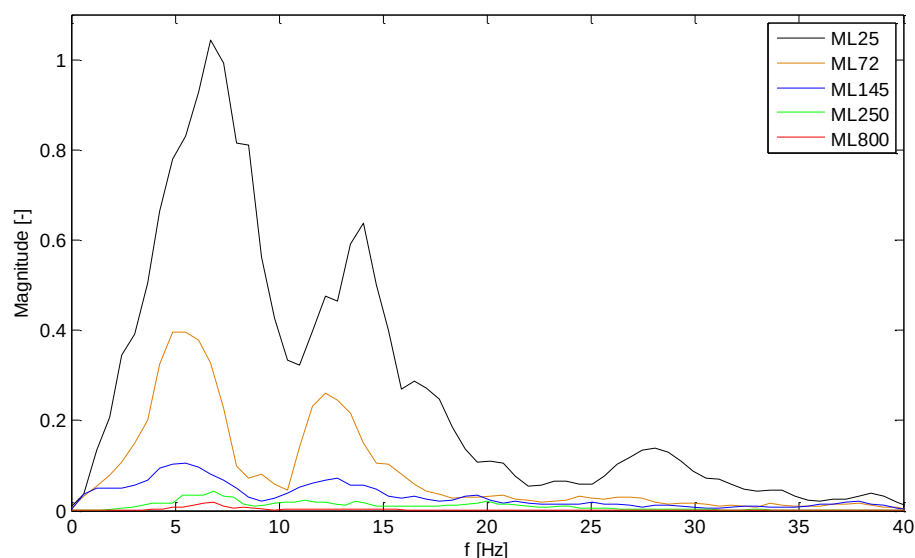


Bild 90: Frequenzanalysen der tiefpassgefilterten Geophondaten über die Entfernung beim Pfahl 2

Bei Erschütterungsmessungen ist neben dem Energieinhalt der Schwingung auch die Analyse der maximalen Geschwindigkeitsamplituden (ähnlich zur Analyse des L_{Peak} Pegels) sowie die Entwicklung der Erschütterungsamplituden über den gesamten Rammverlauf von großem Interesse. Dazu sind in Bild 91 in Form einer Einzelschlaganalyse die maximalen und minimalen Amplituden der vertikalen Bodenwelle für verschiedene Messlokationen über die Rammung aufgetragen und der linken Achse zugeordnet. Der rote Verlauf visualisiert die aufgebrachte Rammenergie des Rammhammers.

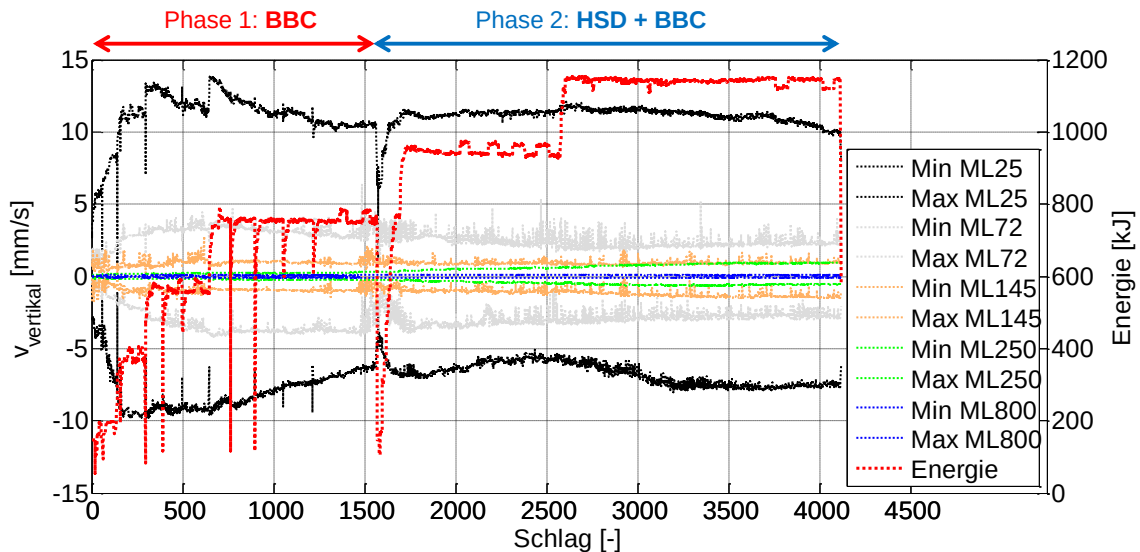


Bild 91: minimale und maximale Amplituden der Bodenschwingung über den Rammprozess für unterschiedliche Messlokalationen bei Pfahl 2

Während sich sowohl bei den Pfahlschwingungen als auch bei den Hydroschallemissionen eine direkte Abhängigkeit der Maximalwerte (Peak-Werte) von der Rammenergie ergibt, ist dieser Effekt bei der Bodenwelle nicht zu beobachten. Lediglich im Nahbereich bei der ML25 ergibt sich infolge der Änderung der Rammenergie ein sprunghaftes Ansteigen der Erschütterungsamplituden. Diese Amplitude bleibt jedoch nicht auf einem konstanten Niveau, sondern reduziert sich in der Folge (z.B. bei Schlag 300 und 600). Bei Steigerung der Rammenergie von 750 kJ auf 950 kJ bzw. von 950 kJ auf 1.140 kJ verbleiben die Amplituden auf dem gleichen Niveau wie bei 750 kJ. Ab der ML72 zeigt sich keine eindeutige Abhängigkeit zur Rammenergie. Grundsätzlich steigen die Amplituden zu Beginn der Rammung mit wachsender Pfahleinbindung und damit einhergehendem steigenden Bodenwiderstand auf einen entfernungsabhängigen Wert an und bleiben bis zum Ende der Rammung bei diesem Wert konstant.

Über die Entfernung nehmen die Amplituden infolge Materialdämpfung und geometrischer Dämpfung kontinuierlich ab. Dennoch ist die Bodenwelle auch in einer Entfernung von 800 m mit Maximalamplituden von 0,1 mm/s noch deutlich detektierbar. Diesen Zusammenhang visualisiert die Analyse in Bild 92. Dargestellt sind die 95%, 50% und 10%-igen Perzentilwerte (Kreuze im Diagramm) der betragsmäßig maximalen Erschütterungsamplituden für jede ML. Ein Perzentilwert ist eine statistische Größe, die die Position eines Wertes mit anderen Werten eines Kollektivs vergleicht. Als Kollektiv sind in dem hier vorliegenden Zusammenhang alle Maximalamplituden an einer ML zu verstehen. Ein 95 % Perzentil bedeutet demzufolge, dass 95 % der ermittelten Werte unterhalb

dieser Amplitude liegen. Der Vorteil dieser Analyse ist, dass entgegen einer Bestimmung des Maximalwertes Ausreißer das Ergebnis nicht verfälschen. Die drei gewählten Perzentilgrenzen spiegeln somit die gewichtete Ober- und Untergrenze, d. h. eine Bandbreite sowie einen mittleren Wert (keinen Mittelwert) wider.

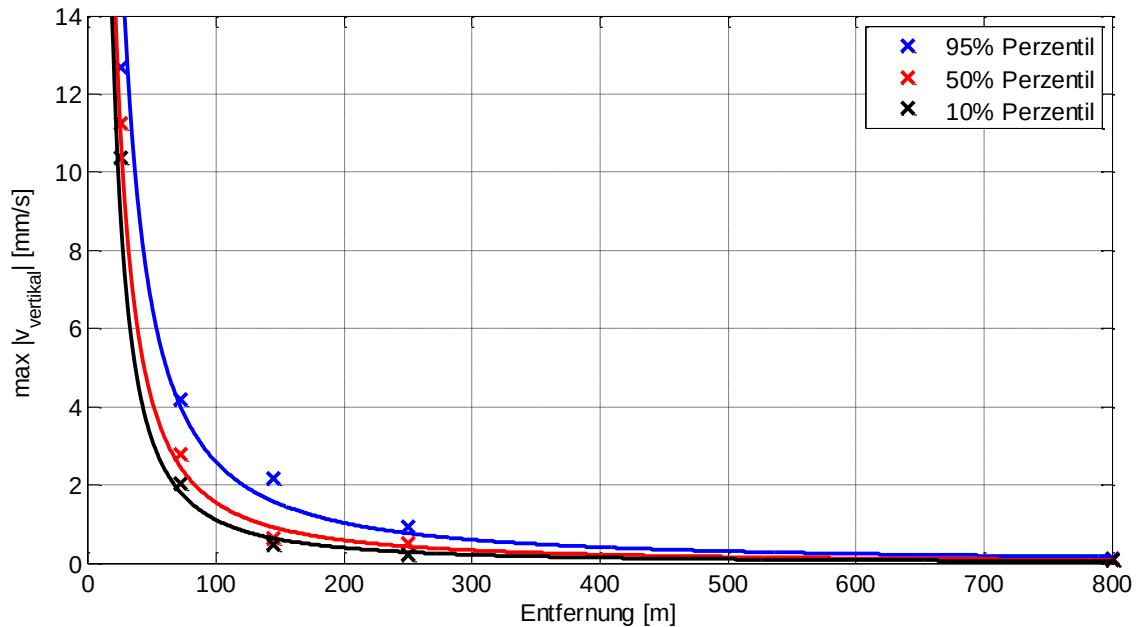


Bild 92: Perzentilanalyse der maximalen vertikalen Schwingungsamplituden

Wie bereits in Bild 91 veranschaulicht, werden im Nahbereich des Pfahles vertikale Erschütterungsgeschwindigkeiten zwischen 10 mm/s und 13 mm/s erfasst. Diese nehmen bis in eine Entfernung von 145 m auf unter 2 mm/s ab und sind in größerer Entfernung nur noch mit sehr sensiblen Sensoren auf dem Meeresboden erfassbar. Die Differenz zwischen dem 10%- (schwarz) und dem 95%-Perzentil (blau) spiegelt die geringe Bandbreite der maximalen Amplituden einzelner Rammschläge wider.

Aus den Einzelwerten abgeleitete Regressionen ergeben Abklingkurven (durchgezogene Linien), die die Amplitudenabnahmen über die Entfernung mit den mathematischen Beziehungen mit Bestimmtheitsmaßen von über 99 % mit den Gleichungen 8.7 bis 8.9 beschreiben.

$$v_{95} = 1.191,8 \cdot R^{-1,332} \text{ [mm/s]} \quad (8.7)$$

$$v_{50} = 1.011,5 \cdot R^{-1,408} \text{ [mm/s]} \quad (8.8)$$

$$v_{10} = 1.083,9 \cdot R^{-1,496} \text{ [mm/s]} \quad (8.9)$$

Anhand dieser Gleichungen lassen sich unter vergleichbaren Randbedingungen Erschütterungsamplituden infolge offshore Pfahlrammungen prognostizieren. Dabei kann der v_{10} -Wert für geringe Rammenergien bis etwa 200 kJ angesetzt werden. Der v_{95} -Wert repräsentiert mögliche Maximalamplituden und der v_{50} -Wert gibt einen durchschnittlichen Wert an.

8.5.2 Ermittlung von Pegelwerten

Neben der Analyse von Einzelgrößen wie der Maximalamplitude wurden auch die Energiegehalte der Schwingungsverläufe der Geophone im Rahmen einer Einzelschlaganalyse ausgewertet. Diese Auswertung dient dem Zweck zu untersuchen, ob und wie sich die Erschütterungen infolge der Rammung verändern. Der Einzelereignispegel SEL_{Geo} wurde dabei analog zum Hydroschall nach Gleichung 2.3 jedoch nach Studer, et al. (2007) mit einem Referenzwert $v_0 = 1 \mu\text{m/s}$ ermittelt (vgl. Tabelle 1). Damit ergibt sich die Einheit zu $[\text{dB re } 1 \mu\text{m}^2/\text{s}]$. Das Ergebnis dieser Auswertung für den vertikalen Anteil der Erschütterung über die Entfernung ist in Bild 93 zu sehen.

Es zeigt sich ein ähnliches Ergebnis wie zuvor bei der Analyse der Amplituden. Zunächst werden die Pegelwerte SEL_{Geo} mit fortschreitender Rammung größer, bleiben jedoch bereits ab Schlag 500 weitestgehend konstant. Das bedeutet, dass sich ab diesem Moment auch der Schwingungsverlauf hinsichtlich Amplitude, Dauer und Frequenz nicht mehr wesentlich ändert. Ein Einfluss der Steigerung der Rammenergie ist im weiteren Verlauf der Rammung nicht festzustellen. Mit wachsender Entfernung nehmen die Pegel ab. Auch das zusätzlich zum DBBC ab etwa Schlag 1600 eingesetzte HSD-System bewirkt erwartungsgemäß keinen Einfluss auf die Erschütterungen. Über die Rammung zeigt sich nah am Pfahl (ML25, ML72) eine leicht fallende Tendenz der Erschütterungspegel. In größerer Entfernung (ML145 und ML250) hingegen steigt der Pegel geringfügig an. Gründe hierfür können in einer Überlagerung mit Raumwellen liegen, die bei größerer Rammenergie und Pfahleinbindung an Einfluss gewinnen, aber in größere Entfernungen abstrahlen.

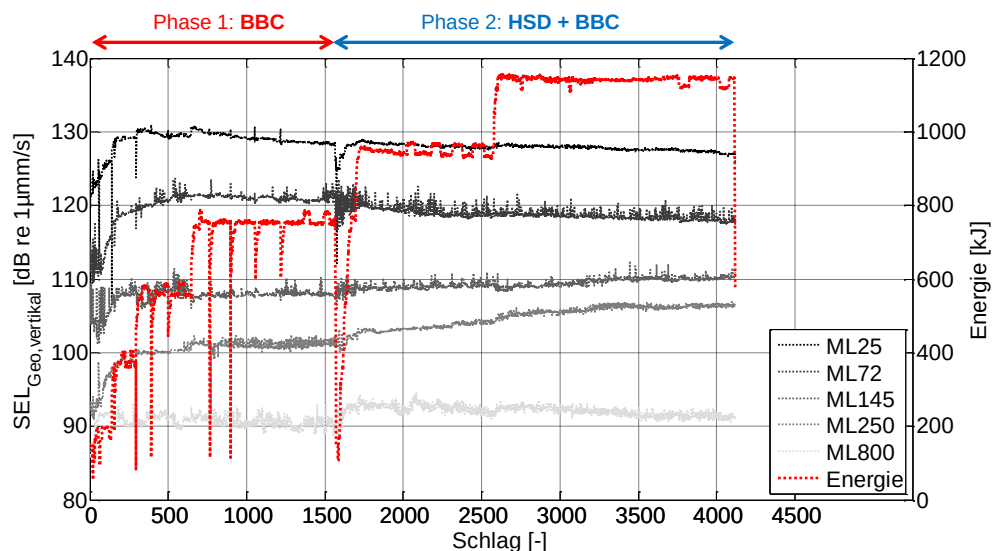


Bild 93: Einzelereignispegel der Bodenschwingung während der Rammung an verschiedenen ML bei Pfahl 2

8.6 Interaktion der Systemkomponenten Pfahl, Wasser und Boden

Die zuvor erläuterten Ergebnisse der umfangreichen Messungen in den Einzelmedien Pfahl, Wasser und Boden verdeutlichen, dass es möglich ist, die Wellenausbreitung detailliert zu erfassen und nachzuvollziehen. In diesem Kapitel sollen die Effekte und Zusammenhänge der Einzelmedien in deren Interaktion miteinander analysiert werden. Ziel ist es, Charakteristiken der Dehnwelle im Pfahl sowohl im Wasser und Boden zu finden sowie darüber hinaus die Interaktion der Bodenwellen mit der Hydroschallwelle zu beschreiben. Dazu werden verschiedene Effekte näher beleuchtet.

8.6.1 Erhöhter Hydroschall Einzelereignispegel zu Beginn einer Rammung

Zunächst soll in diesem Zusammenhang der zu Beginn jeder Rammung verhältnismäßig hohe Einzelereignispegel (vgl. Bild 78 unten, Schlag 1 bis 200) im Wasser, der sich in der Folge reduziert, betrachtet werden. Zur Beschreibung dieses Effektes ist es hilfreich, die Messungen der axialen Beschleunigung des Pfahles in Pfahlmitte und am Pfahlfuß hinzuziehen. Diese sind als Geschwindigkeitszeitverlauf exemplarisch für den Rammschlag 100 und 1.000 gemeinsam mit dem gemessenen Hydroschalldruck in 1 m über dem Meeresboden bei ML25 in Bild 94 dargestellt.

Aufgrund der geringen Einbindetiefe und damit verbundenen geringen Dämpfung des Pfahles durch den Baugrund bei Schlag 100 (Bild 94, oben) zeigt sich eine mehrfach auf- und ablaufende Dehnwelle im Pfahl. Es können in etwa der Pfahlmitte (32 m unterhalb OK Pfahl) sieben Reflexionen an den Pfahlendpunkten bestimmt werden. Die ungeraden Zahlen (1, 3, 5, 7) in den Diagrammen verdeutlichen die vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß hinab laufenden Wellen und die geraden Zahlen (2, 4, 6) jene vom Fuß zum Kopf. Gleiches spiegelt sich auch in den Messwerten des Hydrophons wider, in denen jeder Dehnwellendurchlauf klar der Hydroschallwelle zugeordnet werden kann. Der Schlag umfasst ein Schallereignis von etwa 0,2 Sekunden Dauer. Die Plausibilität der Daten kann darüber hinaus durch Ermittlung der Zeitdifferenzen der einzelnen Reflexionen und Multiplikation mit der Dehnwellengeschwindigkeit im Pfahl erfolgen. Daraus ergibt sich eine auf 0,2 m genaue Pfahllängenbestimmung, die in Anbetracht der Randbedingungen als sehr genau bezeichnet werden kann.

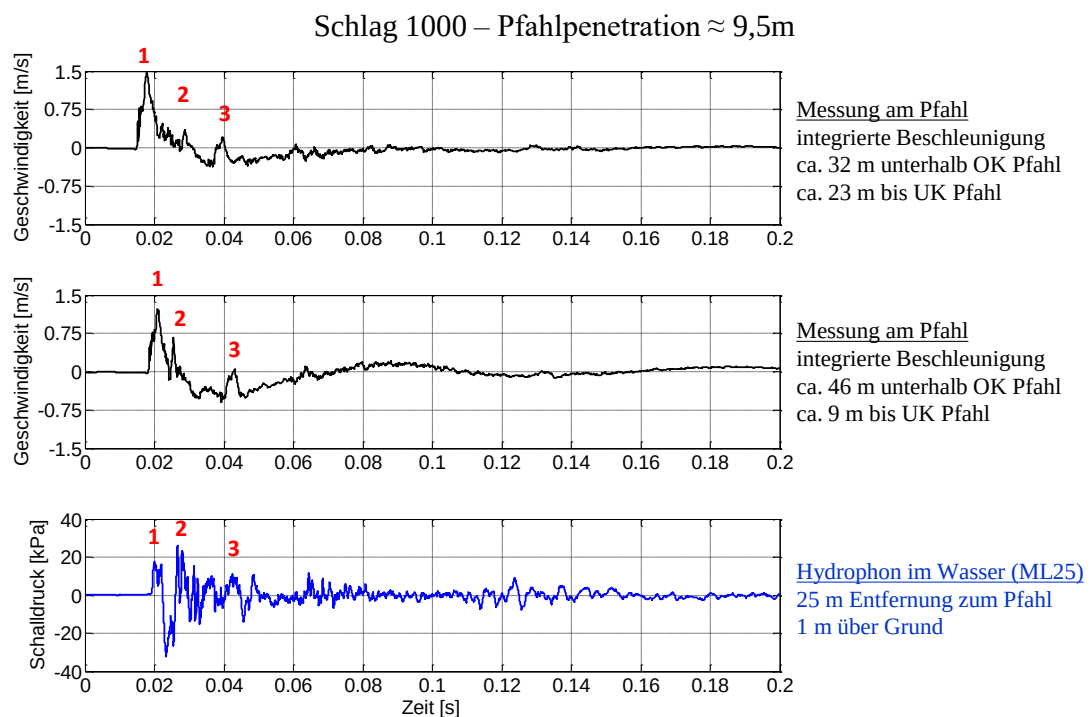
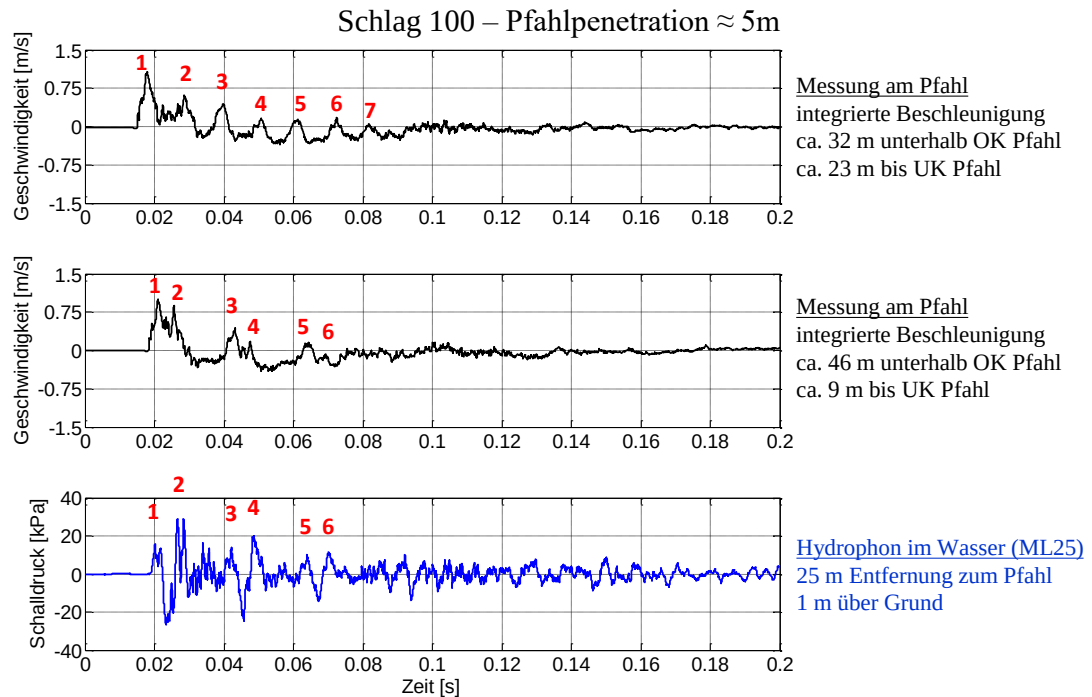


Bild 94: Geschwindigkeitsverlauf der Dehnwelle im Pfahl und Hydroschallwelle im Wasser für zwei unterschiedliche Rammschläge

Bei Betrachtung des Schlages 1.000 (Bild 94, unten) sind bei erhöhter Rammenergie lediglich drei Reflexionen in den Messwerten zu erkennen. Dadurch verkürzt sich das pegelbestimmende Schallereignis im Wasser deutlich auf weniger als 0,1 Sekunden.

Aus der Betrachtung von Pfahl- und Hydroschallmessungen ist ersichtlich, wie bei jedem axialen Durchlauf der Dehnwelle, welche auch eine kurzzeitige radiale Dehnung des Pfahlquerschnitts zur Folge hat, eine Druckwelle vom Pfahl ins Wasser abgestrahlt wird, die wiederum vom Hydrophon erfasst wird. Da es sich bei der Ermittlung des Einzelereignispegels um einen energetischen Pegel handelt, wirkt sich dieser Effekt im Gegensatz zum Spitzenpegel L_{Peak} deutlich aus. Erst mit Erreichen einer Einbindung von in diesem Fall ca. 7 m bei etwa Schlag 250 (Bild 78) wird die in den Pfahl eingebrachte Energie stärker in den Boden übertragen und nicht mehr mehrfach reflektiert. Gleichzeitig wird deutlich, dass ein mehrfacher Dehnwellendurchlauf vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß pegelbestimmend für den Einzelereignispegel ist. Dieser Effekt ist bei vielen Pfahlinstallationen zu beobachten, jedoch in Abhängigkeit der Geologie, Rammenergie, Pfahldurchmesser, etc. unterschiedlich stark ausgeprägt.

8.6.2 Zusammenhänge zwischen Pfahlschwingung mit dem Hydroschall und der Bodendynamik

Die Gegenüberstellung der Zeitbereichsdaten von axialer Pfahlschwingung und Hydroschall hat bereits klare Zusammenhänge ergeben. Ein Vergleich von absoluten Amplituden der Sensoren in den einzelnen Medien ist nicht zielführend, da diese nicht übertragbar sind. Vielmehr lassen sich anhand einer Gegenüberstellung im Frequenzbereich klare Zusammenhänge und Übertragungswege identifizieren. Deshalb wird im Folgenden die Interaktionen im Frequenzbereich vertieft analysiert. Bild 95 stellt die Mediane der ungefilterten Frequenzanalysen der axialen und radialen Pfahlschwingungen (ermittelt aus den Beschleunigungssignalen), dem Hydroschall der ML25 über die Wassertiefe sowie der Bodenschwingung der ML25 in den drei Raumrichtungen des Pfahles 7 gegenüber.

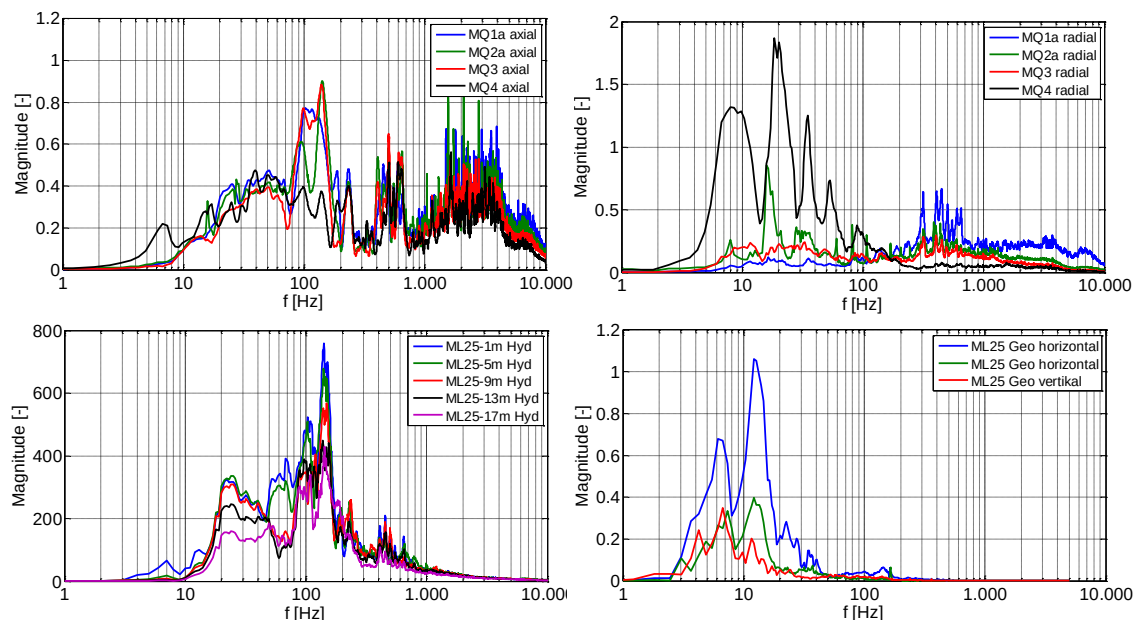


Bild 95: Median der Frequenzanalysen der axialen (oben links) und radialen (oben rechts) Pfahlschwingung sowie des Hydroschalls an der ML25 (unten links) und der Bodenschwingung an der ML25 (unten rechts) beim Pfahl 7

Diese Darstellung soll die Zusammenhänge der frequenziellen Schallausbreitung und deren Interaktion der unterschiedlichen Medien anschaulich verdeutlichen. Bei der axialen Pfahlschwingung (oben links) verändern sich die Spektren in den Messquerschnitten nur geringfügig untereinander. Signifikante Unterschiede sind im Bereich zwischen 80 Hz und 180 Hz, dem Frequenzbereich der maximalen Lautstärke in Bezug auf den SEL (vgl. Bild 83, links oben) zu verzeichnen, bei denen sich die Peakwerte mit

wachsendem Abstand zum Pfahlkopf reduzieren. Eine weitere Differenz zeigt sich beim MQ4 in der Form, dass sich bei 7 Hz ein Peak zeigt, der bei den anderen MQ's nicht vorhanden ist. Darüber hinaus schwingt der Pfahl sehr hochfrequent mit Frequenzen oberhalb von 1.000 Hz.

Die Frequenzgehalte im Wasser bei der ML25 über die Wassertiefe (unten links) ergibt große Übereinstimmungen zu den axialen Pfahlschwingungen bis ca. 800 Hz. Grundsätzlich sind im Hydroschall Frequenzen zwischen 20 und 200 Hz enthalten, mit den größten Amplituden bei etwa 150 Hz. Die Amplitude reduziert sich dabei mit geringerer Wassertiefe. Frequenzanteile oberhalb 1.000 Hz sind im Gegensatz zur axialen Pfahlschwingung im Wasser nicht enthalten und breiten sich offensichtlich nicht in Form von Druckschwankungen aus. Auffällig ist ein kleinerer lokaler Peak bei 7 Hz beim Hydrophon 1 m über dem Meeresboden. Dieser passt exakt zum Peak der axialen Pfahlschwingung bei der MQ4. In größerer Distanz zum Meeresboden ist er nicht mehr vorhanden.

Das Diagramm oben rechts zeigt die Frequenzspektren der radialen Pfahlschwingung. Darin zeigt sich in den MQ1 bis MQ3 ein vergleichsweise einheitliches Verhalten über den gesamten Frequenzbereich bis 10.000 Hz, ohne lokale Peakwerte. Die MQ4 unterscheidet sich jedoch maßgeblich von den anderen MQ, da hier sehr tieffrequente Schwingungen mit Frequenzspitzen zwischen 7 Hz bis 10 Hz und deren Vielfachen entstehen.

Beim Vergleich dieses Ergebnisses mit den Frequenzspektren des Geophons (unten rechts) an der ML25 spiegeln sich ebenfalls große Übereinstimmungen wider. Auch hier ist ein Peak bei etwa 7 Hz sowie deren Vielfachen in den drei Raumrichtungen ersichtlich.

Beim Vergleich aller vier dargestellten Diagramme ergeben sich große Übereinstimmung zwischen den beiden Diagrammen auf der linken Seite und denen auf der rechten Seite. Gleichwohl unterscheiden sich die linken Diagramme stark von den rechten Diagrammen. Offensichtlich steht die axiale, längsgerichtete Pfahlschwingung in engem Zusammenhang mit der Hydroschallausbreitung im Wasser mit Frequenzanteilen im höherfrequenten Bereich oberhalb von 20 Hz. Die radiale Pfahlschwingung mit Frequenzen unterhalb von 20 Hz hingegen wirkt sich dagegen sehr stark auf die Wellenausbreitung im Boden aus.

Neben der Interaktion im Nahbereich zwischen Pfahl, Wasser und Boden ist die Interaktion zwischen Wasser und Boden in Abhängigkeit der Entfernung von Interesse, um eine

gegenseitige Beeinflussung beurteilen zu können. Dafür sind in Bild 96 die Ergebnisse der ungefilterten Frequenzanalysen für die Nahbereichssensoren der vertikalen Bodenschwingung (oben) denen der Hydrophone in 1 m über dem Meeresboden (unten) in unterschiedlichen Entfernungen zum Pfahl gegenübergestellt.

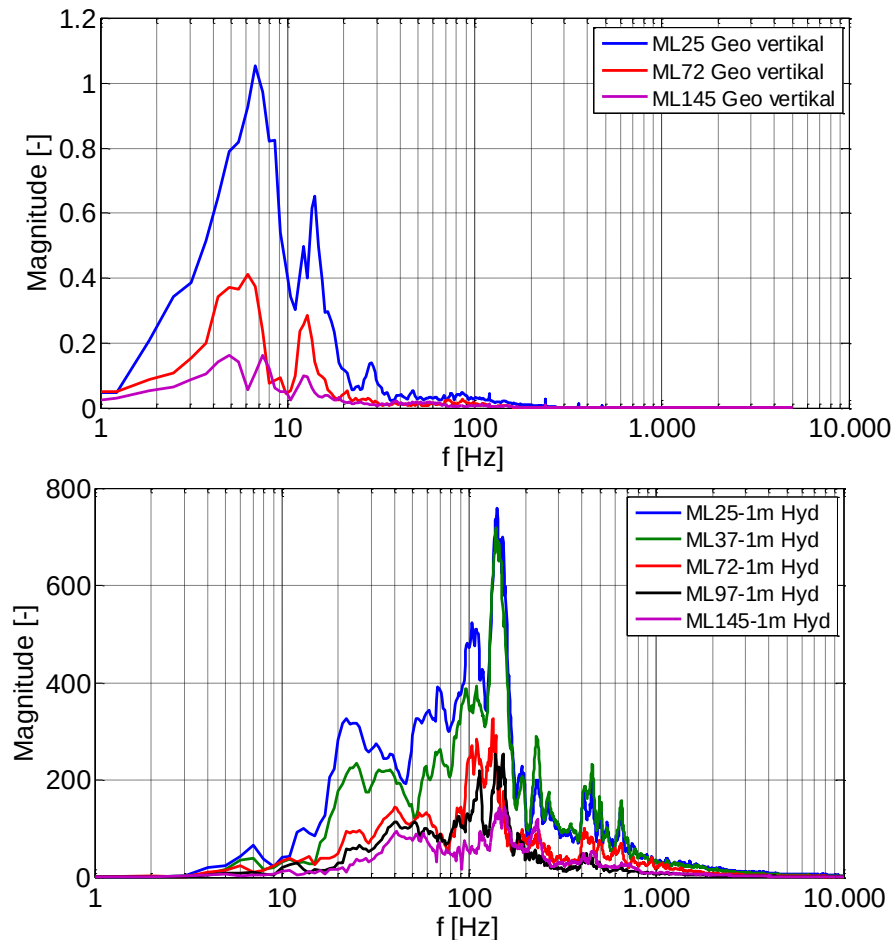


Bild 96: Median der Frequenzanalysen des Hydroschalls in 1m über dem Meeresboden und der vertikalen Bodenwelle über die Entfernung beim Pfahl 7

Die sich im Boden ausbreitenden Wellen mit einer dominierenden Frequenz von 7 Hz bzw. 14 Hz ist auch in den Ergebnissen der Hydroschallmessungen bis zur ML72 ersichtlich, in größerer Entfernung nicht mehr. Die Amplituden reduzieren sich mit wachsender Distanz. Hochfrequente Wellenanteile sind in der Bodenwelle nicht vorhanden, sondern ausschließlich im Wasser.

Es ist daraus abzuleiten, dass die Bodenwelle unter den projektspezifischen Randbedingungen im Nahbereich Einfluss auf die Ausbreitung der Hydroschallwelle im tieffrequenten, langwelligen Frequenzbereich nimmt. Dem gegenüber beeinflusst der hochfrequente, kurzwellige Hydroschall die Ausbreitung der Bodenwelle nicht.

8.6.3 Einfluss der Bodenwelle auf den Hydroschall

Bereits in Abschnitt 8.5 wurde der Einfluss des Hydroschalls auf die Messergebnisse der Geophone und damit die Interaktion zwischen Hydroschall und Bodendynamik angesprochen und analysiert. Dieses Zusammenspiel soll hier nochmals vertieft und gegenübergestellt werden.

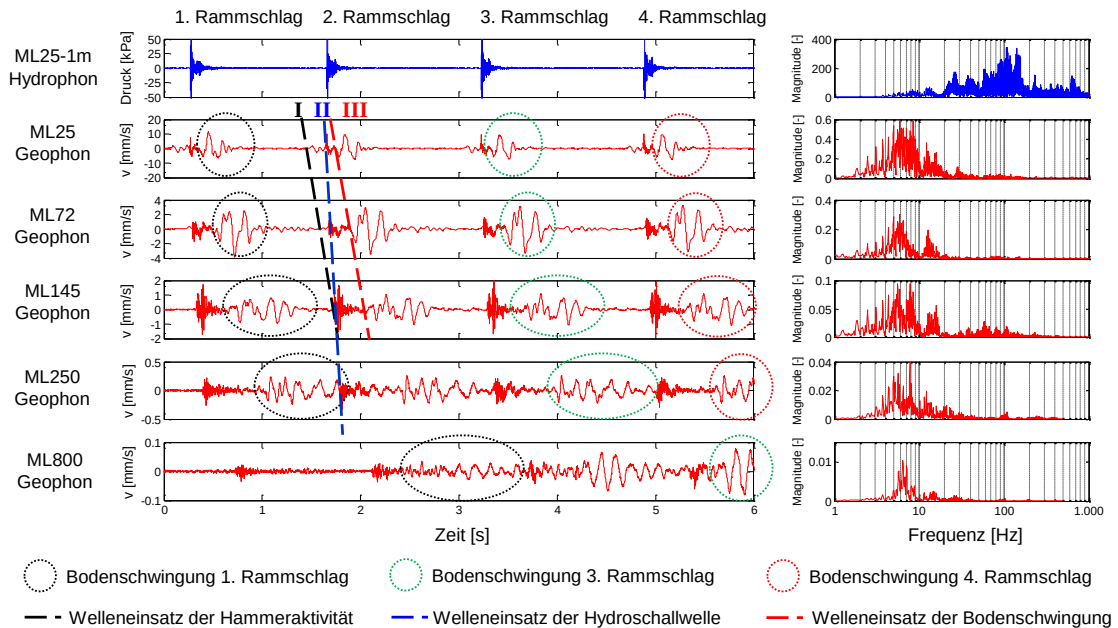


Bild 97: Zeitsignal des Schalldrucks im Wasser und der Bodenschwingung in verschiedenen Abständen zum Pfahl bei mehreren aufeinanderfolgenden Rammschlägen zu Beginn einer Schlagserie

Bild 97 zeigt die ermittelten vertikalen Erschütterungen des Meeresbodens (rot) an den ML25 bis ML800 während der Installation von Pfahl 2 sowie zum zeitlichen Vergleich den korrespondierenden Hydroschalldruckverlauf an der ML25 im Wasser 1 m über dem Meeresboden (blau). Es sind die ersten vier Rammschläge einer Rammserie dargestellt. Rechts neben den Verläufen sind jeweils die dazugehörigen, mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) ausgewerteten Frequenzspektren gezeigt. Eine ähnliche Darstellung zeigt bereits Bild 86, jedoch ohne den korrespondierende Hydroschalldruckverlauf. Diese Gegenüberstellung bestätigt und beschreibt einmal mehr den Hydroschallimpuls im Geophonsignal, der bei der ML25 bei jedem Rammschlag zeitsynchron von beiden Sensoren erfasst wird. Darüber hinaus zeigen sich in den dazugehörigen Spektren rechts neben den Zeitverläufen die dominierenden Frequenzbereiche im Wasser (oberhalb 40 Hz) und Boden (unterhalb 40 Hz). Dennoch sind die Frequenzanteile der jeweils anderen Welle im Signal des einen Mediums enthalten, jedoch mit deutlich geringerer Amplitude.

Exemplarisch sind für den zweiten Rammschlag (durch gestrichelte Linien markiert) drei Welleneinsätze (I/schwarz, II/blau, III/rot) markiert, deren Neigung sich anhand der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten ergibt. Diese Welleneinsätze sind bei jedem Rammschlag vorhanden. Zunächst ist pfahlnah ein dem Hydroschallimpuls vorlaufender Welleneinsatz (I) zu erkennen, der vermutlich aus der Hammeraktivität kommt. Der hochfrequente Rammimpuls (II) im Wasser ist zeitgleich bei dem korrespondierenden Geophon an ML25 sowie den Messpositionen in größerer Entfernung erkennbar. Die sich entlang der Meeresbodenoberfläche ausbreitende Bodenwelle (III) breitet sich mit einer geringeren Geschwindigkeit aus, als die Hydroschallwelle. Die in derselben Farbe eingekreisten Signalanteile markieren die jeweils zusammengehörende Bodenschwingung eines Rammschlages an verschiedenen Messlokalationen.

Die Tiefpassfilterung zur Auswertung der Geophondaten war notwendig, um den ausschließlich sensorbedingten Einfluss der Hydroschallwelle auf die Erschütterungsamplituden zu eliminieren. Nicht zuletzt aufgrund der eingangs beschriebenen verhältnismäßig ernüchternden Ergebnisse der pfahlnahen Schallminderungssysteme beim ESRa-Test (vgl. Kap. 2.4) besteht ein großes Interesse, den Einfluss der Bodenwelle auf den Hydroschallpegel besser zu verstehen. Dies ist durch die umfangreichen Messungen und daraus erzielten Erkenntnisse möglich. Der dominierende Frequenzinhalt der Bodenwelle ergibt sich aus den Geophonmessungen eindeutig zwischen 1 bis 40 Hz. Demzufolge können auch nur derartige Frequenzen Einfluss auf den Hydroschallpegel nehmen. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde jeder einzelne Rammschlag gemessen an allen Hydrophonen im Nahbereich einer Hochpassfilterung mit einer Grenzfrequenz von $f_G = 40$ Hz unterzogen. Aus den hochpassgefilterten Signalen wurde der SEL ermittelt und vom SEL der ungefilterten Rohsignale aus Kapitel 8.4 subtrahiert. Die sich dabei ergebende Pegeldifferenz ΔSEL repräsentiert den Anteil der Frequenzen zwischen 1 bis 40 Hz und damit den Einfluss der Bodenschwingung auf den Hydroschallpegel.

$$\Delta\text{SEL} = \text{SEL}_{\text{hydro,ungefiltert}} - \text{SEL}_{\text{hydro,hochpassgefiltert}} (f_G = 40 \text{ Hz}) \quad (8.10)$$

Die Medianwerte der sich daraus ergebenden Differenzpegel (ΔSEL) im Nahbereich sind in Bild 98 an jeder Messposition im Wasser als Schallkarte analog zu Bild 79 dargestellt. Die größte Differenz und damit der größte Einfluss der Bodenschwingung ergibt sich erwartungsgemäß pfahlnah am Meeresboden. Dieser beträgt für die untersuchte Pfahlrammung bis zu 1 dB. Im Weiteren nimmt der Einfluss der niederfrequenten

Signalanteile mit wachsender Entfernung zum Pfahl und Abstand zum Meeresboden ab. Ab etwa 80 m ist der Einfluss der tieffrequenten Bodenschwingung nahezu nicht mehr im Hydroschall vorhanden.

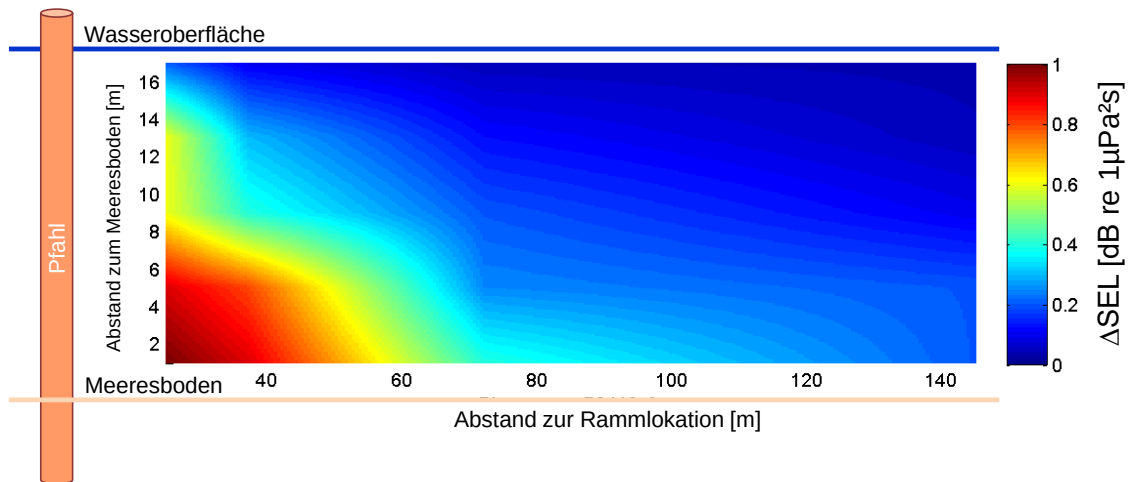


Bild 98: Einfluss der 0 – 40 Hz Bodenschwingung auf den Einzelereignispegel (SEL) des Hydroschalls bei ungeminderter Schallausbreitung bei Pfahl 7

Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass erwartungsgemäß den Pfahl über die Wassertiefe abschirmende pfahlnahe Schallminderungssysteme den Einflussbereich der Bodenschwingungen nicht abdecken können und es zu der in Kapitel 2.4 beschriebenen Bodenkopplung bzw. Untertunnelung kommen kann. Diese ist mit maximal 1 dB sehr gering.

Der beim ESRa-Test beschriebene Einfluss von 2 bis 3 dB auf den SEL in einer Entfernung von 750 m bestätigt sich bei den Pfahlinstallationen beim Windpark *Amrumbank West* in dieser Größenordnung nicht. Die Ursache dafür liegt in den Randbedingungen der betrachteten Pfahlinstallationen. Beim ESRa-Test wurde ein unverhältnismäßig langer Pfahl (65 m Einbindung) untersucht, der sich bereits seit mehreren Jahren in der Ostsee befindet. Dieser hat allein aufgrund der Einbindelänge eine gute Ankopplung an den Boden, die sich aufgrund von Anwachseffekten infolge der langen Standzeit weiter erhöht hat. Infolge der Rammschläge wurde keine Pfahlverschiebung ermittelt und parallel durchgeführte Tragfähigkeitsmessungen zeigten keine Pfahlfussreflexion (vgl. Bild 99). Dies deutet auf eine vollständige Abstrahlung der Energie in den Meeresboden und damit größeren Einfluss der Bodenwelle auf den Hydroschall hin.

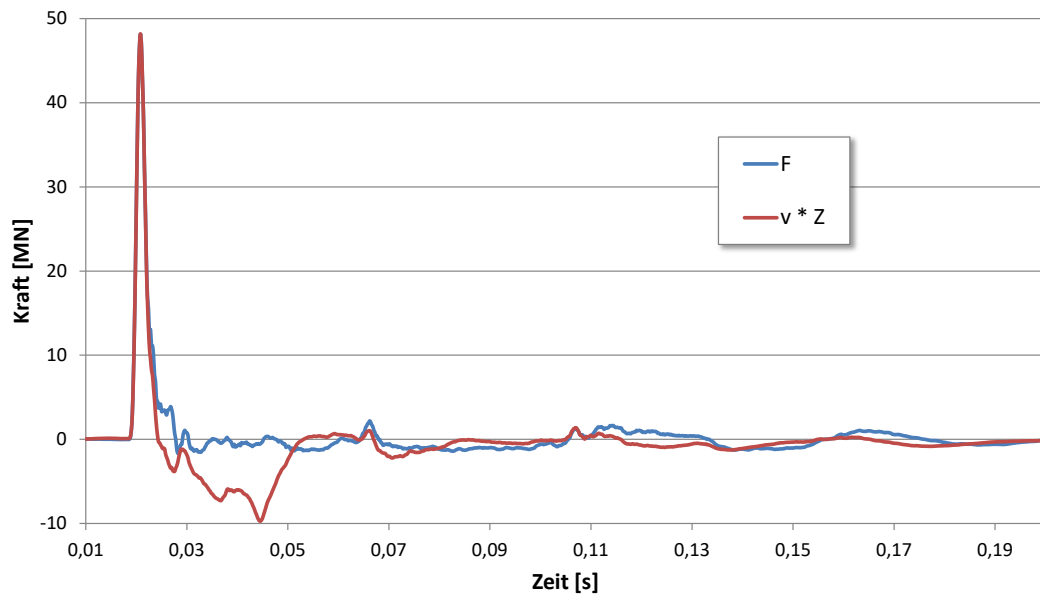


Bild 99: gemessener Kraftverlauf (F) und bezogene Geschwindigkeit ($v \cdot Z$) eines Rammstoßes beim ESRa-Test (Wilke et al., 2012)

Beim Windpark *Amrumbank West* wurden die Pfähle mit Vortrieb und damit stetig wachsender Einbindelänge in den Meeresboden getrieben. Eine Pfahlfussreflexion ist bei jeder Rammschlag erkennbar (vgl. Kap. 8.3.2). Es entsteht bei jedem Rammschlag eine Scherfuge in der Grenzfläche zwischen Pfahlmantel und Boden, die eine Energieübertragung dämpft. Demzufolge ist auch die Energie der Bodenwellen geringer. Unter diesem Aspekt sind Werte von bis zu 1 dB durchaus realistisch.

Der beim ESRa-Test erzeugte Schallausbreitung infolge Pfahlrammung ist aufgrund der signifikant unterschiedlichen Randbedingungen nicht mit der einer Pfahlrammung mit stetig wachsendem Vortrieb vergleichbar.

9 Schlussfolgerungen

Die Erfassung der Wellenausbreitung infolge von Offshore-Rammarbeiten ist aufgrund der Überlagerung der unterschiedlichen Wellentypen sehr komplex. Das Wellenfeld variiert in den Medien Pfahl, Wasser und Boden sowohl zeitlich als auch räumlich. Dies erfordert neben einer hohen Messpositionsichte eine möglichst zeitsynchrone Erfassung der Messgeber. Darüber hinaus ist bei der Auswahl der Messgeber auf Robustheit für Offshoremessungen sowie bei der Positionierung der Sensoren auf Redundanz zu achten, da es zu Ausfällen kommen kann.

Aus der Analyse der axialen Pfahlschwingungen in den Messquerschnitten im Wasser (MQ1 bis 3) ergeben sich dominierende Frequenzen zwischen 80 Hz und 200 Hz (Bild 70). Die axiale Eigenfrequenz des Pfahles liegt demnach in diesem Frequenzbereich. Derselbe Frequenzbereich zeigt sich pegelbestimmend bei den Hydroschallemissionen im Meerwasser (Bild 83). Entgegen der Annahme, dass die radialen Pfahlschwingungen maßgebend für die Hydroschallpegel sind, ergibt sich anhand dieser Analyse ein anderer Zusammenhang. Plausibel erscheinen die Ergebnisse insbesondere deshalb, da die durch den Hydraulikhammer erzeugte Energie axial in den Pfahl eingeleitet, um eine Pfahlpenetration zu bewirken. Aus diesem Grund beinhaltet die axiale Pfahlschwingung auch den größten Energieinhalt.

Sämtliche radialen Pfahlschwingungen sowie die axialen Schwingungen im MQ4 sind im Vergleich zu den axialen der MQ1 bis MQ3 deutlich tieffrequenter zwischen 10 Hz und 40 Hz (Bild 70). Diese Frequenzen korrelieren mit denen der Bodenschwingungen ermittelt an der Meeresbodenoberfläche und markieren ebenfalls die Eigenfrequenz (Bild 90). Insbesondere mit wachsender Einbindetiefe des Pfahles in den Meeresboden lässt sich eine geringfügige Abnahme der dominierenden Frequenzen erkennen. Aus der Bodendynamik sind Eigenfrequenzen im System Boden-Bauwerk zwischen 1 Hz bis 15 Hz bekannt. Je größer dabei die Gebäudemasse, desto geringer die Eigenfrequenz. Dies lässt sich auf die Pfahl-Boden-interaktion übertragen. Infolge der transienten Ramimpulse und daraus resultierenden Dehnwelle im Pfahl wird der Boden in Schwingung versetzt. Diese mitschwingende Bodenmasse wird mit fortschreitender Pfahleinbindung immer größer, weshalb sich die Eigenfrequenz verringert.

Aus der Interaktion von Bodenwelle und Hydroschall konnte infolge der tieffrequenten Bodenwelle ein Einfluss des Meeresbodens auf den Hydroschallpegel von bis zu 1 dB_{SEL} im Nahbereich bis 30 m Entfernung zum Pfahl ermittelt werden (Bild 98). Eine Untertunnelung pfahlnaher Schallminderungssysteme ist demzufolge möglich. Eine eventuelle Minderung dieses Einflusses durch zusätzliche Anbauten am pfahlnahen Schallminderungssystem (Eindrücken von Schallisolierenden Körpern oder Materialien in den Meeresboden) erscheint nur mit hohem Aufwand möglich. Voraussetzung dafür sind genauere Untersuchungen und Kenntnisse, bis zu welcher Tiefe die Bodenwellen Einfluss auf den Hydroschall nehmen. Generell ist festzuhalten, dass aufgrund des relativ geringen Bodeneinflusses zu bezweifeln ist, dass die erzielbare Schallminderung diese technischen und wirtschaftlichen Anstrengungen rechtfertigt.

Aus den Untersuchungen des Referenzpfahles ohne Schallminderungssystem hat sich pfahlnah eine Zunahme des Schallpegels zum Meeresboden hin ergeben (Bild 79). Begründet werden kann dies unter anderem durch den zuvor beschriebenen Einfluss der Bodenwelle. Darüber hinaus kommt es beim Übergang des Pfahles in den Meeresboden zu einem Impedanzkontrast, der in Abhängigkeit des anstehenden Bodens und dessen Steifigkeit zu Reflexionen führt. Auch dies kann eine Pegelsteigerung im Bereich der Meeresbodenoberfläche bewirken.

Ein weiteres Ziel des Messprogrammes war die Untersuchung der Wirksamkeit der Schallminderungssysteme einzeln und in Kombination. Aus den Einzelmessungen konnten unterschiedliche Wirkungsbereiche hinsichtlich der geminderten Frequenzen der Systeme (BBC hochfrequent, HSD tieffrequent) bestimmt werden. Zudem zeigt sich eine deutliche Steigerung der Dämpfungswirkung durch den kombinierten Einsatz von BBC und HSD. Insbesondere die unterschiedlichen Wirkungsbereiche der beiden Systeme wirken sich dabei positiv aus und ergänzen sich. Die Kombination von unterschiedlichen Schallminderungsmaßnahmen hat sich in diesem Projekt bewährt und stellt eine verlässlichere Lösungsmöglichkeit für die Einhaltung der Grenzwerte bei der Installation von Offshore-Gründungspfählen dar.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Zum Schutz von maritimen Lebewesen in Nord- und Ostsee und insbesondere dem Schweinswal sind bei den Gründungsinstallationsarbeiten für Offshore Windenergieanlagen zur Einhaltung der vom BSH vorgeschriebenen Lärmschutzwerte Schallminderungsmaßnahmen zwingend erforderlich. Zur besseren Auslegung und Optimierung dieser Maßnahmen und zur Reduktion der damit verbundenen Kosten ist die Kenntnis der Wellenausbreitungscharakteristik im Gesamtsystem Pfahl-Boden-Wasser notwendig. Deshalb wurden im Rahmen der Installationsarbeiten beim Offshore Windpark *Amrum-bank West* in der deutschen Nordsee umfangreiche pfahldynamische, hydroakustische und seismische Messungen durchgeführt und analysiert. Dazu wurden zunächst die Charakteristiken innerhalb der Einzelmedien Stahlpfahl, Wasser und Boden untersucht und diese dann in Interaktion betrachtet.

Die durch den Hydraulikhammer in den Pfahl induzierte Rammenergie breitet sich in Form einer Dehnwelle mit einer Wellengeschwindigkeit von etwa 5.400 m/s in axialer Richtung im Pfahl aus. Zu Beginn jeder Rammung wird die Dehnwelle aufgrund der geringen Pfahleinbindung mehrfach reflektiert und durchläuft den Pfahl mehrfach, was zu einer mehrfachen Schallabstrahlung und damit erhöhten Schallpegeln SEL im Meeresswasser führt. Mit wachsender Einbindelänge und damit einhergehendem steigenden Bodenwiderstand erhöht sich die abstrahlende Mantelfläche des Pfahles und damit die Energieübertragung in den Meeresboden, so dass die Dehnwelle nicht mehr mehrfach reflektiert wird und die einzelnen Rammschläge nur 20 ms bis 30 ms andauern. Dies ist auch bei der Steigerung der Rammenergie der Fall, die notwendig wird, um den Pfahl tiefer in den Boden zu treiben.

Der Pfahl wird im Zuge der Rammschläge zu Schwingungen angeregt, die sich über ein breites Frequenzspektrum zwischen 10 Hz und 10.000 Hz sowohl in axialer als auch radialer Richtung erstrecken. In der Analyse hat sich gezeigt, dass in axialer Richtung Frequenzen zwischen 20 Hz und 500 Hz dominieren, die im Wesentlichen ins Meerwasser abgestrahlt werden (Bild 70, links) und sich pegelbestimmend auf den Hydroschall auswirken (Bild 83). Die radialen Pfahlschwingungen, insbesondere im Einbindungs-bereich des Pfahles, werden von tieffrequenten langwelligen Schwingungen von unter 20 Hz dominiert (Bild 70, rechts), die in den Meeresboden übertragen werden und mit denen sich die Bodenwellen (Bild 90) ausbreiten. Dieser hypothetische Ansatz erscheint

anhand der Messdaten plausibel. Dabei ist anzumerken, dass den Feldmessungen zahlreiche unkontrollierbare Randbedingungen unterliegen, so dass sich Effekte überlagern, die die Modellvorstellung beeinflussen. Aus diesem Grunde sollten Modellversuche zur Verifizierung dieser Hypothese durchgeführt werden, bei denen die Randbedingungen definiert kontrollierbar sind und einzelne Einflussfaktoren isoliert untersucht werden können. In diesem Zusammenhang stellen ergänzende Laboruntersuchungen eine sinnvolle Ergänzung dar, um auch quantitative Aussagen treffen zu können.

Während sich der Hydroschall mit einer Wellengeschwindigkeit von etwa 1.500 m/s im Meerwasser (Bild 54) ausbreitet, ist die sich an der Meeresbodenoberfläche ausbreitende Bodenwelle mit etwa 260 m/s deutlich langsamer.

Aus den Messungen der Hydroschalldrücke über die Wassertiefe und Entfernung zum Pfahl ergibt sich eine Pegelabnahme mit größer werdendem Abstand zum Meeresboden sowie einer Pegelabnahme mit größerer Entfernung (Bild 79). Die Rammenergie wirkt sich unmittelbar auf den Hydroschallpegel aus. Aus den erzeugten Messdaten konnten empirische Ansätze zur Ermittlung von Hydroschallpegelwerten SEL und L_{Peak} für eine ungeminderte Schallausbreitung abgeleitet werden (Bild 80).

Die Geophonmessungen auf der Meeresbodenoberfläche stellt sich infolge der Sensorposition und -geometrie in der Analyse komplizierter dar, da die Erschütterungsverläufe von der Hydroschallwelle überlagert werden. Diese Einflüsse konnten durch die Anwendung einer Filterfunktion eliminiert werden. Es konnten Schwinggeschwindigkeitsamplituden ermittelt werden, die eine Prognose von Maximalamplituden in Abhängigkeit der Entfernung zum Installationsort ermöglicht. Eine Änderung der Rammenergie wirkt sich nur unwesentlich auf die Maximalwerte der Schwinggeschwindigkeitsamplituden sowie auf die Schwingungsform und -pegelwerte aus (Bild 91, Bild 93).

In Bezug auf die untersuchten Schallminderungsverfahren Hydro-Sound-Damper und Großer Blasenschleier wurde die Effektivität separat und in Kombination untersucht. Beide Verfahren reduzieren den Hydroschall in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Dabei zeigt sich das HSD-System im tieffrequenten Bereich bis 500 Hz wirksam, der große Blasenschleier dagegen im hochfrequenten Bereich oberhalb von 100 Hz (Bild 83). In Kombination ergänzen sich beide Verfahren und konnten eine Schallminderung von bis zu 19,8 dB_{SEL} erzeugen. Schlussfolgernd bietet die Kombination zweier oder mehrere Schallminderungsverfahren die Möglichkeit, Monopiles mit großen

Durchmessern installieren zu können und dabei die Schallschutzgrenzwerte verlässlich einzuhalten.

Anhand der frequenziellen Analyse der Erschütterungs- und Hydroschallmessungen wurden klare Unterschiede beschrieben und bewertet. So ergaben die Messungen, dass sich die durch den Meeresboden übertragenen Bodenwellen im Nahbereich bis etwa 70 m mit einer Größenordnung von bis zu 1 dB auf den SEL-Pegel auswirken können. Pfahlnahe Schallminderungssysteme werden durch diesen Übertragungsweg unterlaufen und können den auf diese Weise entstehenden Bodenschall nicht wirksam reduzieren.

Schlussfolgernd hat sich das entwickelte Messkonzept und die Auswahl der Sensorik als zweckmäßiges Instrument zur Ermittlung und Bewertung von dynamischen Messungen unter äußerst anspruchsvollen projektspezifischen offshore-Randbedingungen in den unterschiedlichen Ausbreitungsmedien Pfahl, Wasser und Boden bewährt. Eine Übertragbarkeit des Konzeptes und der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Windparks mit anderen Randbedingungen hinsichtlich Geologie, Wassertiefe, Pfahldurchmesser, Rammenenergie usw. sollte Gegenstand weiterer Forschung sein. Darüber hinaus können die ermittelten Erkenntnisse und Zusammenhänge durch numerische Untersuchungen weiter validiert und verifiziert werden.

Die aktuellen Planungen zur Installation von Offshorewindparks sehen nach wie vor die Installation von Monopilegründungen in Verbindung mit dem Impulsrammverfahren als Standardverfahren vor. Die Herausforderungen ergeben sich aus den jeweiligen projektspezifischen Randbedingungen insbesondere aus der Wassertiefe bis 40 m und damit einhergehenden größeren Pfahleinbindungen von ebenfalls etwa 40 m sowie einem größeren Pfahldurchmesser von 8 m und mehr. Zur Optimierung der Schallminderung bereits an der Quelle wird ebenfalls seitens der Impulshammerhersteller gearbeitet. In diesem Zusammenhang sind unter anderem das PULSE (piling under limited stress equivalent) Verfahren des Herstellers *IHC* sowie das *MNRU* (Menck noise reduction unit) Verfahren der Firma *Menck* zu nennen, mit dem die Rammschlagdauer verlängert und gleichzeitig die Peakwerte reduziert werden sollen. Auch das Blue Piling Verfahren verfolgt dieses Ziel. Ein Überblick mit der Erläuterung dieser und anderer Verfahren ist in einer Veröffentlichung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) nachzulesen (Koschinski et al., 2020). Die Ziele dieser Verfahren liegen in einer Verschiebung des Quellspektrum hin zu tieferen Frequenzen. Welche Auswirkungen das auf die Ausbreitungswege des

Hydroschalls und der Bodenwelle hat, ist ebenfalls Ziel weiterer Forschung. Die Erkenntnisse dieser Arbeit können sehr hilfreich für die weiteren Planungen und Auslegungen von Schallminderungskonzepten bei zukünftigen Projekten sowohl in Bezug auf den Impulshammer, das Pfahldesign als auch das eingesetzte Schallminderungssystem sein.

In Bezug auf die schallärmere Pfahleinbringung mittels Vibrationsrammung sind die dargestellten Zusammenhänge zu überprüfen bzw. weitere Forschungen anzustreben. Insbesondere sind die Effekte aus der unterschiedlichen Schwingungsanregung zu untersuchen. Beim Impulsrammverfahren wird eine transiente, kurzzeitige Schallausbreitung infolge der einzelnen Rammschläge erzeugt, deren frequenziellen Zusammensetzung ausschließlich aus dem Zusammenspiel von Hammer- und Pfahldesign entsteht und nur sehr aufwändig bzw. gar nicht verändert werden kann. Bei der Vibrationsrammung werden harmonische, periodische Schwingungen erzeugt, die kontinuierlich über den Vibrationsprozess andauern. Insbesondere die Vibrationsfrequenz kann leicht über die Steuerung variiert und eingestellt werden. Die bei unterschiedlichen Frequenzen entstehenden Zusammenhänge hinsichtlich der Wellenausbreitung in den Medien Stahl, Wasser und Boden sollten untersucht werden, um beispielsweise die Wirkung von Resonanzeffekten auf die Pfahleinbringung aber auch Schallausbreitung bestimmen zu können. Die Kenntnis darüber kann auch für das Decommissioning bzw. den Rückbau von Gründungspfählen interessant sein.

11 Literaturverzeichnis

Bellmann, M. (2014). Overview of existing Noise Mitigation Systems for reducing Pile-Driving Noise. Melbourne, Australia: inter.noise 2014; 43rd International Congress on Noise Control Engineering November 16-19, 2014.

Bellmann, M., Kühler, R., Matuschek, R., Müller, M., Betke, K., Schuckenbrock, J., Remmers, P. (2018). Noise Mitigation during large foundations (Monopile L & XL) . Berlin: Bundesamt für Naturschutz, International Conference on Noise Mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines - Technical options for complying with noise limits.

Bellmann, M., May, A., Wendt, T., Gerlach, S., Remmers, P., & Brinkmann, J. (2020). Unterwasserschall während des Impulsrammverfahrens: Einflussfaktoren auf Ramm-schall und technische Möglichkeiten zur Einhaltung von Lärmschutzwerten; Erfahrungs-bericht Rammschall mit und ohne technische Schallminderungsmaßnahmen. Olden-burg.

Bellmann, M., Remmers, P., Gündert, S., Müller, M., Holst, H., & Schultz von Glahn, M. (2015). Is there a State-of-the-Art regarding Noise Mitigation Systems to reduce Pile-Driving Noise? Berlin: Conference on Wind energy and Wildlife impacts (CWW 2015).

Betkhovskikh, L.-M., L.-M., & Lysanov, Y.-P., Y.-P. (2003). Fundamentals of Ocean A-coustics. 3rd edition. New York: Springer Verlag.

Biot, M. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Journal of the Acoustic Society of America, Vol. 28, pp. 168-191.

Bruns, B. (2013). Evaluation of hydro sound and vibration measurements during the use of the Hydro-Sound-Dampers (HSD) at the wind farm "London Array". San Francisco: Acoustical Society of America.

Bruns, B. (2014). The new noise mitigation system Hydro Sound Dampers: history of development with several hydro sound measurements. Melbourne, Australia: inter.noise 2014; 43rd International Congress on Noise Control Engineering November 16-19, 2014.

Bruns, B., Gattermann, J., Kuhn, C., & Elmer, K.-H. (2013). Offshore Test of Hydro Sound Dampers at 'London Array' - Measurements of noise mitigation and ground vibrations. DEWI-Magazin Nr. 43.

- Bruns, B., Kuhn, C., Stein, P., Gattermann, J., Elmer, K.-H., & Imhorst, F. (2012). Underwater noise reduction from measurements and offshore tests using systems of hydro sound dampers (HSD). Bremen: DEWEK 2012 - German Wind Energy Conference.
- BSH. (2013). Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK4).
- Coolen, J., Ockels, W., & Voskuil, M. (2011). Alternatives and Modifications of Monopile Foundation or its Installation Technique for Noise Mitigation. Niederlande: TU Delft.
- Dahl, P. H., & Reinhall, P. G. (2011). Underwater Mach wave radiation from impact pile driving: Theory and observation.
- Dahl, P. H., & Reinhall, P. G. (2011). Underwater Mach wave radiation from impact pile driving: Theory and observation. *Acoustical Society of America*(130), 1209-1216.
- Danish Energy Agency. (2023). Guideline for underwater noise - Installation of impact an vibratory driven piles.
- DEGA. (2006). Akustische Wellen und Felder, DEGA Empfehlung 101. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.
- DGGT. (2002). Empfehlung des Arbeitskreises Baugrunddynamik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). Berlin.
- DGGT. (2012). Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle - EA Pfähle. Berlin: Ernst und Sohn.
- Diederichs, A., Pehlke, H., Nehls, G., Bellmann, M., Gerke, P., Oldeland, J., Rose, A. (2014). Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten – Schlussbericht Hydroschall-Off BWII. Förderkennzeichen 0325309A/B/C. Husum.
- DIN 1320:1997-06. (1997). Akustik - Begriffe. (Deutsches Institut für Normung, Hrsg.) Beuth Verlag.
- DIN 4150-1 (2022): Erschütterungen im Bauwesen – Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Ausgabe 2022-12
- DIN 45630:1971-12. (1971). Grundlagen der Schallmessung: Physikalische und subjektive Größen von Schall. (Deutsches Institut für Normung, Hrsg.) Beuth Verlag.
- Dührkop, J., Siegl, K., Heins, E., & Pucker, T. (2019). Bemessung von XXL-Monopiles - Aktuelle Erfahrungen und Herausforderungen im Geotechnischen Design. Braunschweig: Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Pfahlsymposium.

- Elmer, K.-H., Betke, K., & Neumann, T. (2007). Standardverfahren zur ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Winergieanlagen SCHALL 2. BMU-Forschungsvorhaben 0329947.
- Elmer, K.-H., Gattermann, J., Fischer, J., Bruns, B., Kuhn, C., & Stahlmann, J. (2011). Hydroschalldämpfer zur Reduktion von Unterwasserschall bei Offshore-Gründungen. Braunschweig: Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Pfahlsymposium.
- Fischer, J., Fritsch, M., & Middendorp, P. (2014). Dynamische Pfahlprobelastungen Offshore - Erkenntnisse zur Datenerfassung und Auswertung. Braunschweig: Messen in der Geotechnik, Institut für Grundbau und Bodenmechanik.
- Gerdes, F., & Ludwig, S. (2014). Besonderheiten der Schallausbreitung in der Ostsee. Berlin: 2. Schallschutz-Tagung der DUH: Wege zu einem wirksamen Unterwasserschallschutz beim Bau von Offshore-Windparks.
- Gerusel, K. (1998). Fortschrittsberichte VDI/11 Bd.11: Atmungsschwingungen von Hohlzylindern und daraus resultierende Luftschallabstrahlung. Berlin.
- Griesmann, K., Gerasch, W.-J., & Rustemeier, J. (2009). Bauphysik-Kalender 2009: Hydroschall beim Bau und Betrieb von Offshore-Windenergieanlagen. Berlin: Ernst & Sohn, S. 681-707.
- Haupt, W. (1986). Bodendynamik - Grundlagen und Anwendung. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg und Sohn.
- Haupt, W., & Herrmann, R. (1986). Querschnittsbericht 1986, Dynamische Bodenkennwerte. Nürnberg: Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern, Heft 48.
- Hoffmann, S., Quiroz, T., Widerspan, V. (2022), Ad-hoc Analyse: Entwicklung der OWEA-Gründungsstrukturen hinsichtlich Gründungsdurchmesser und Kolkschutzmaßnahmen / Flächenversiegelung, Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme, IWES
- Hydrotechnik Lübeck. (2016). <http://www.hydrotechnik-luebeck.de>. Abgerufen am 07. 10 2016 von <http://www.hydrotechnik-luebeck.de>.
- Klein, G. (2001). Bodendynamik und Erdbeben. In U. Smoltczyk, Grundbautaschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen (6. Auflage Ausg., S. 347-398). Berlin: Ernst & Sohn.
- Knödel, K., Krummel, H., & Lange, G. (2005). Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten - Band 3: Geophysik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2013). Entwicklung schallmindernder Maßnahmen beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen. Bundesamt für Naturschutz, Nehnten und Hamburg.
- Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2020). Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines - Technical options for complying with noise limits. Federal Agency for Nature Conservation (Bundesamt für Naturschutz, BfN).
- Lorenz, K., & Richter, T. (2004). Ein Beitrag zur Beurteilung der Wirksamkeit geophysikalischer Verfahren für die Ortung von Hohlräumen und Auflockerungszonen des historischen Bergbaus. 3. Altbergbau-Kolloquium. Freiberg.
- Lucke, K. (2007). Möglicher Einfluß der Offshorewindenergienutzung auf marine Lebewesen. Wilhelmshafen: Deutsches Windenergie-Institut GmbH.
- Medwin, H. (2005). Sounds in the Sea, From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography. New York: Cambridge University Press.
- Meskouris, K., Hinzen, K.-G., Butenweg, C., & Mistler, M. (2007). Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen - Anwendungen - Beispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Minnaert, M. (1933). On musical air-bubbles and the sound of running water. *Philosophical Magazine*(16 (104): 235-248).
- Möser, M. (2012). Technische Akustik, 9., aktualisierte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Müller, A., & Zerbs, C. (2011). Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen. Hamburg.
- Müller, A., & Zerbs, C. (2013). Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßnahmen. Hamburg.
- NABU (-). Abgerufen am 01. März 2022 von <https://schleswig-holstein.nabu.de/imperia/md/content/schleswig-holstein/gutachtenstellungennahmen/nabu-meeressaueger-brosch.pdf>
- Nehls, G., & Bellmann, M. (2016). Weiterentwicklung und Erprobung des „Großen Blasenschleiers“ zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten. (Schlussbericht FKZ 0325645A/B/C/D).
- Netherlands Enterprise Agency. (2020). Hollandse Kust (noord) Wind Farm Zone - Appendix A: Applicable Law Part of Project and Site Description.

NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59. (2018). 2018 Revision to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0), Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. Abgerufen am 12. 12 2023 von <https://www.fisheries.noaa.gov/s3/2023-05/TECHMEMOGuidance508.pdf>

Philipp, E. (2015). Mitigation of piling noise during construction of offshore windfarms – special focus OWP DanTysk and Sandbank. Abgerufen am 19. 12 2023 von https://rave-offshore.de/files/downloads/konferenz/konferenz-2015/Session8_2015/8.4_Philipp.pdf

Remmers, P., & Bellmann, M. (2015). Untersuchung und Erprobung von Hydroschall-dämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen - Auswertung der Hydroschallmessungen im OWP London Array. Oldenburg: Institut für technische und angewandte Physik GmbH (itap).

Richard, R. (1979). Journal of the Geotechnical Engineering Division - Volume 105. American Society of Civil Engine.

Rogowsky, S. (6. Juli 2005). Fakultät für Physik - Universität Regensburg. Abgerufen am 27. Oktober 2014 von <http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/schwarz/Physik-Musik-2005/06-Schall.pdf>

Rustemeier, J., Neuber, M., Grießmann, T., Ewaldt, A., Uhl, A., Schulz von Glahn, M., Luebben, A. (2012). Konzeption, Erprobung, Realisierung und Überprüfung von lärmarmen Bauverfahren und Lärminderungsmaßnahmen bei der Gründung von Offshore-WEA SCHALL3: Abschlussbericht zum BMU-Forschungsvorhaben FKZ 0327645. Hannover.

Selinger, K. (Dezember 2011). Factsheet Offshore-Windpark Amrumbank West. Abgerufen am 25. 06 2015 von http://www.eon.com/content/dam/eon-com/en/downloads/1/111216_Factsheet_Amrumbank_dt.pdf

Siegl, K. (2017). Zur Pfahldynamik von geramnten Großbohrpfählen und resultierender Wellenausbreitung in Wasser und Meeresboden. Hamburg: Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg.

Sinambari, R., & Sentpali, S. (2014). Ingenieurakustik, Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele, 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Stahlmann, J., Gattermann, J., Bruns, B., Kuhn, C., & Stein, P. (2015). Untersuchung und Erprobung von Hydro-Schall-Dämpfern (HSD) zur Minderung von Unterwasserschall bei Rammarbeiten für Gründungen von OWEA. BMWi-Abschlussbericht 0325365, Braunschweig.
- Studer, J. A., Laue, J., & Koller, M. G. (2007). Bodendynamik - Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze (3. Auflage Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Studer, J., & Ziegler, A. (1986). Bodendynamik: Grundlagen, Kennziffern, Probleme. Berlin: Springer.
- Thiele, R. (2002). Vermeidung und Verminderung von Belastungen der Meeresumwelt durch Offshore-Windenergieanlagen im küstenfernen Bereich der Nord- und Ostsee. Mitteilung beim Fachgespräch zum UBA-Projekt am 15.01.2002.
- Thomson, F., Lüdemann, K., Kafemann, R., & Piper, W. (2006). Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. BIOLA, Hamburg: COWRIE Ltd.
- Umweltbundesamt. (2011). Empfehlungen von Schallschutzgrenzwerten bei der Errichtung von Offshore Windenergieanlagen. Positionspapier von UBA FG II 2.3 (Meeresschutz). Dessau.
- UNESCO. (1981). Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. Paris: UNESCO Technical Papers in Marine Science.
- Urick, R. (1983). Principles of underwater sound, 3rd edition. Los Altos/CA, USA: Peninsula Publishing.
- Veit, I. (1979). Flüssigkeitsschall. Würzburg: Vogel-Buchverlag.
- Veit, I. (2005). Technische Akustik. Würzburg: Vogel Buchverlag.
- von Estorff, O., Heitmann, K., Lippert, S., Lippert, T., Reimann, K., Runau, M., & Schwarz, M. (2013). Unterwasser-Rammschall: Eine Herausforderung bei der Errichtung von Offshore-Windparks und für die numerische Simulation. Lärmbekämpfung, 8(02/2013).
- von Plein, J., Lippert, T., Lippert, S., & von Estorff, O. (2022). Scaling laws for unmitigated pile driving: Dependence of underwater noise on strike energy, pile diameter, ram weight, and water depth. Applied Acoustics 198:108986.
- Vrettos, C. (2008). 1.8 Bodendynamik. In K. J. Witt, Grundbau-Taschenbuch , Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.

Wilke, F., Kloske, K., & Bellmann, M. (2012). Evaluation von Systemen zur Rammschallminderung an einem Offshore-Testpfahl (ESRa) - technischer Abschlussbericht. FZK 0325307.

Wilken, D. (2009). Zur Anwendung von Schwarmintelligenz-Optimierung auf die Dispersionsanpassung von Scholtewellen, Dissertation, Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Kiel.

WindEurope. (2019). Offshore Wind in Europe - Key trends and statistics 2018 (<https://windeurope.org>).

Wisner, G., Stammen, E., Dilger, K., Sychla, H., Stein, P., Kornemann, C., & Gattermann, J. (2015). Adhesive bonding of measurement equipment on impact driven offshore monopile foundations. Applied Adhesion Science a SpringerOpen Journal.

Wochner, M., Lee, K., McNeese, A., & Wilson, P. (2014). Attenuation of low frequency underwater noise using arrays of air-filled resonators. Melbourne, Australia: inter.noise 2014; 43rd International Congress on Noise Control Engineering November 16-19, 2014.

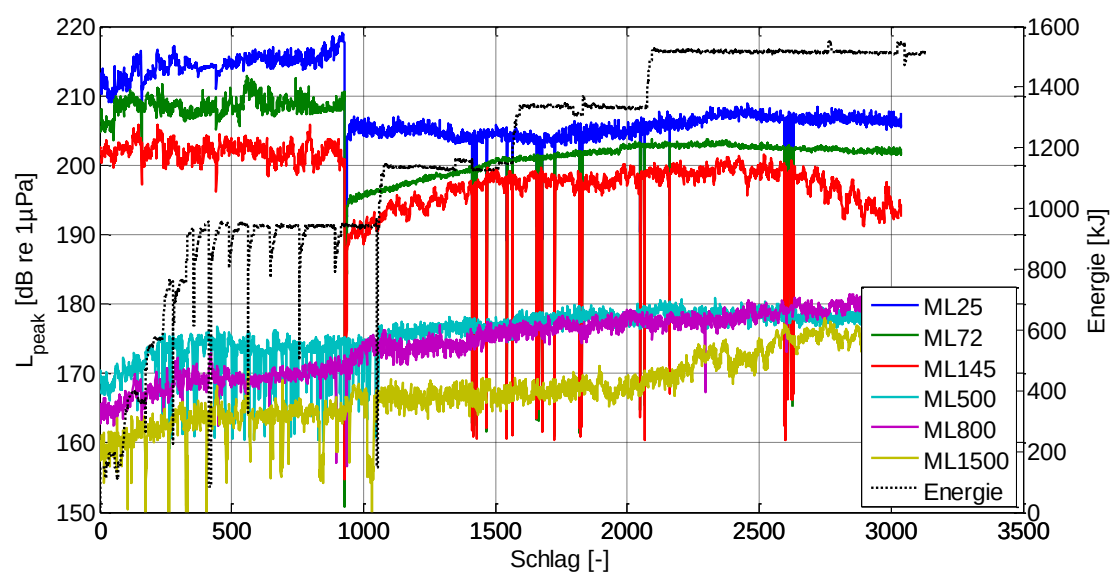
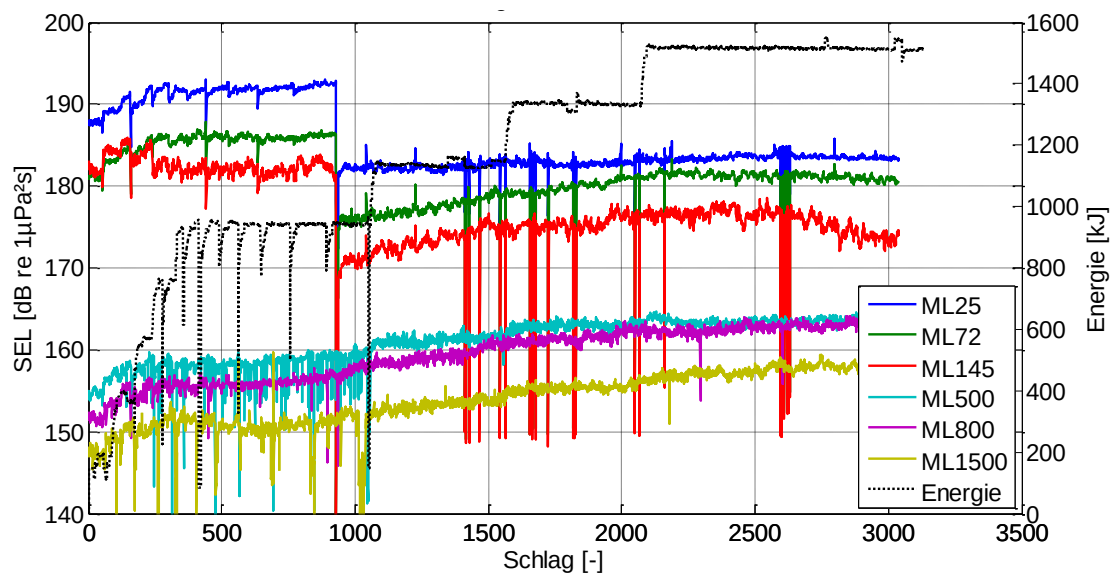
WWF (13. Mai 2016). Abgerufen am 08. März 2019 von <https://www.wwf.de/themen-projekte/meere-kuesten/meeresschutz/meeres-schutzgebiete/meeresschutzgebiete-in-deutschland>

Anhang

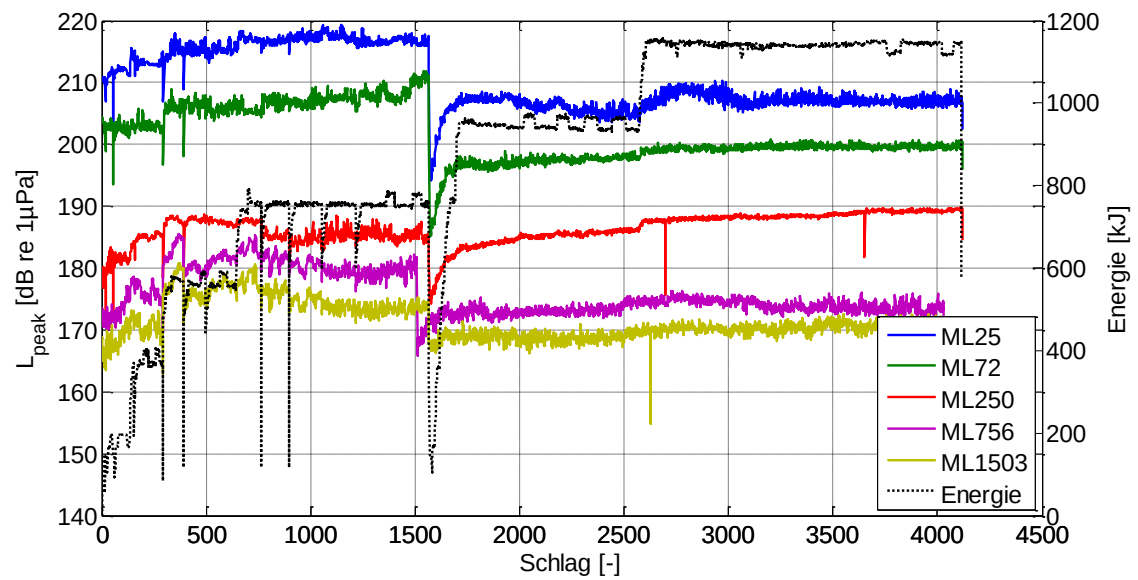
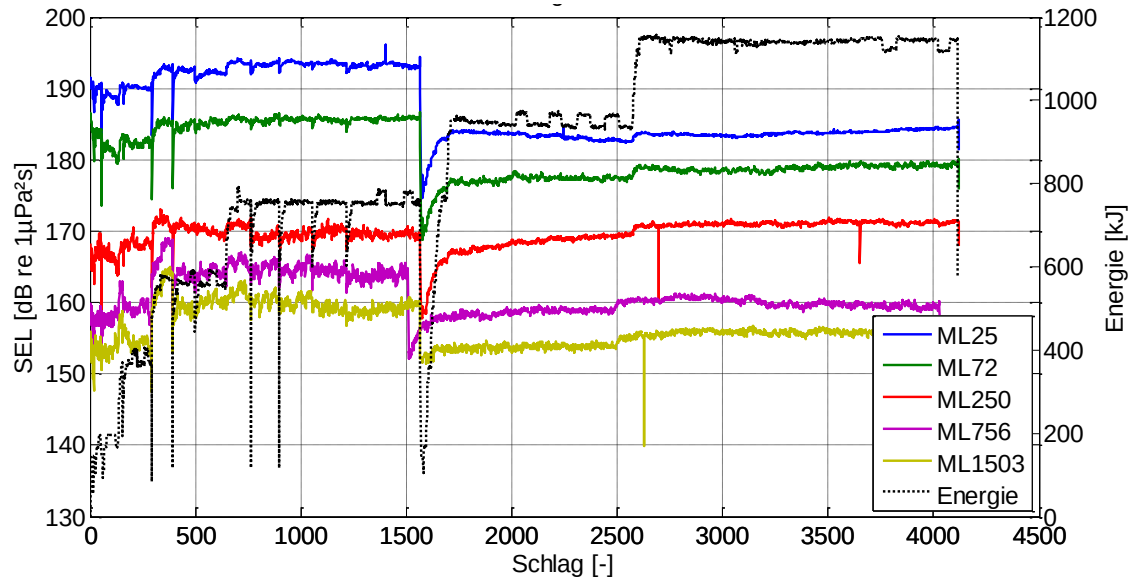
Anhang A Entwicklung Schallpegel über Rammung

Im Folgenden ist die Entwicklung der Schallpegel (SEL und L_{peak}) sowie der Rammenergie an verschiedenen Messlokalationen ermittelt in 1 m über dem Meeresboden während der Rammung dargestellt.

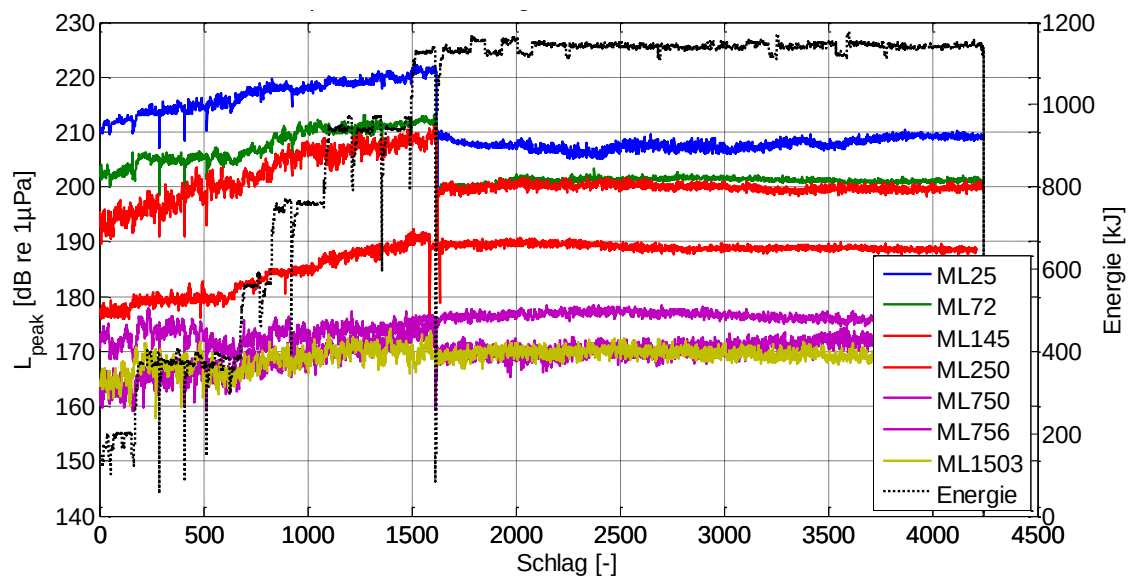
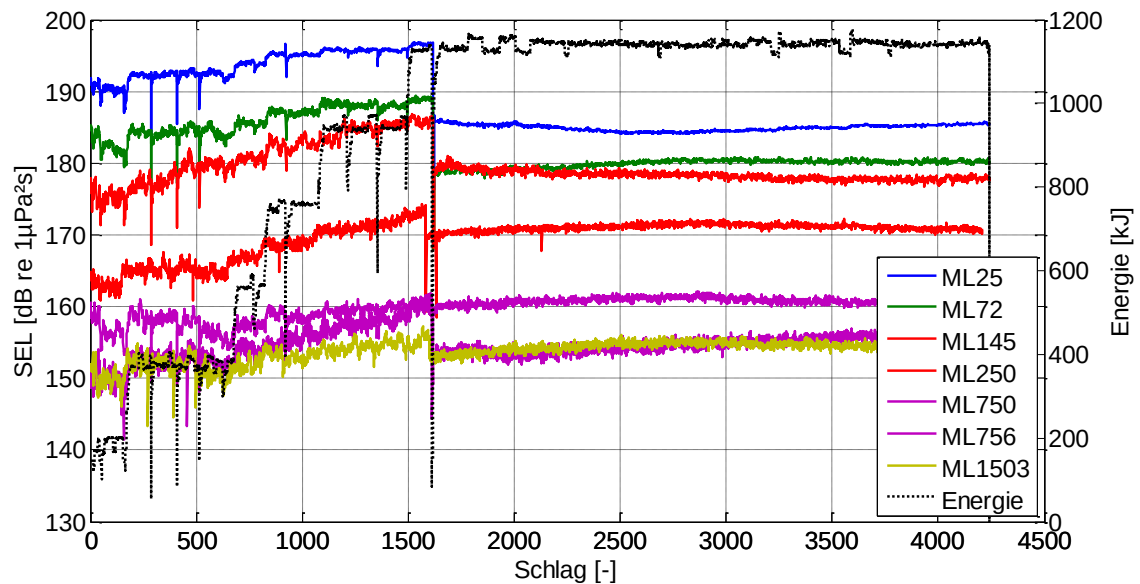
Pfahl: 1
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ca. ab Schlag 900



Pfahl: 2
Schallminderungssysteme: HSD + BBC
Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 1568



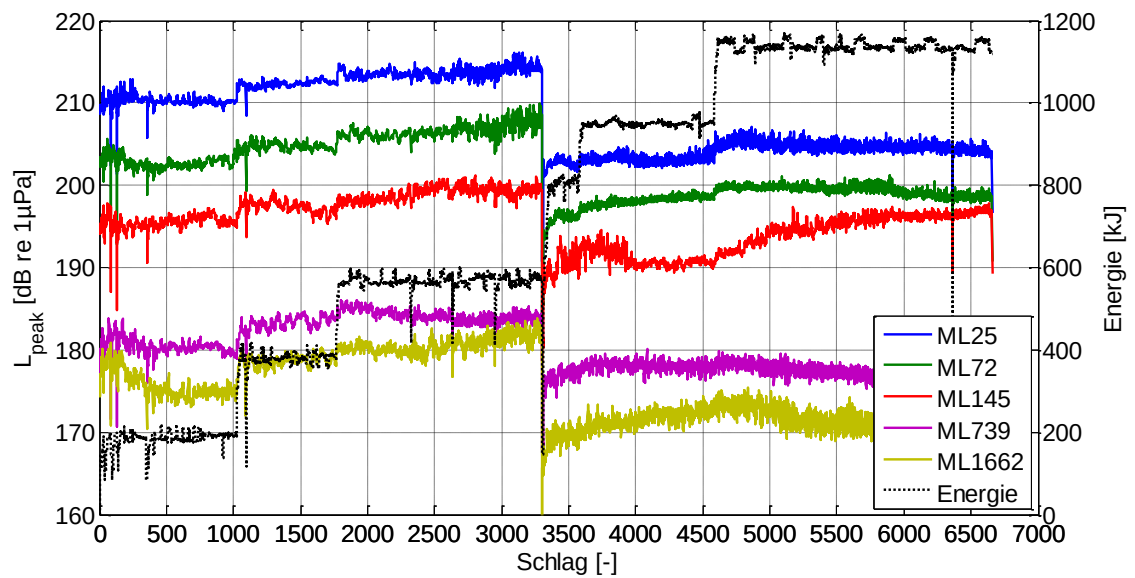
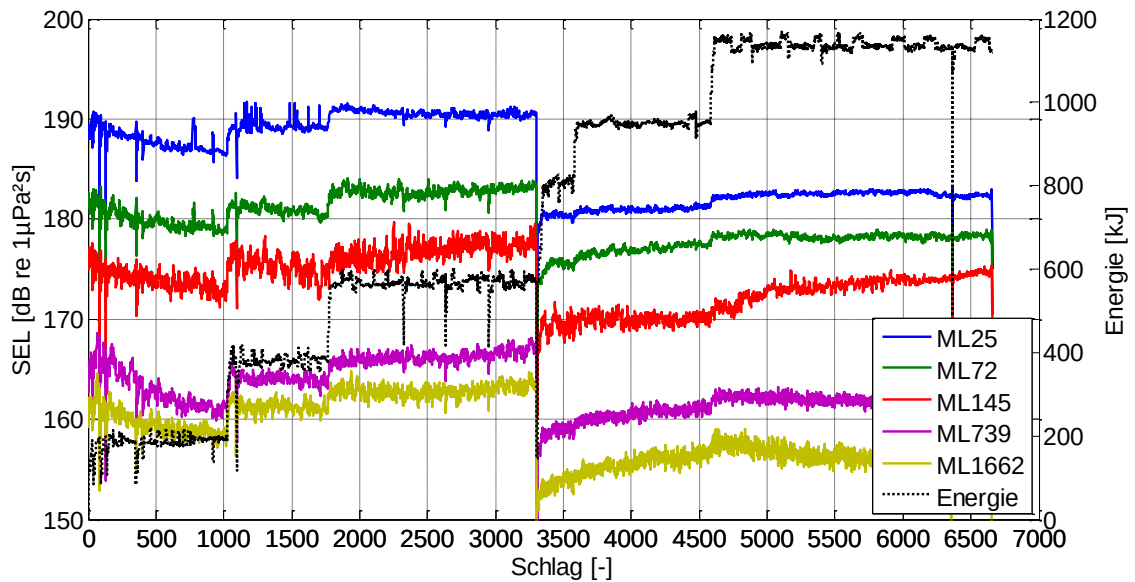
Pfahl: 3
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 1615



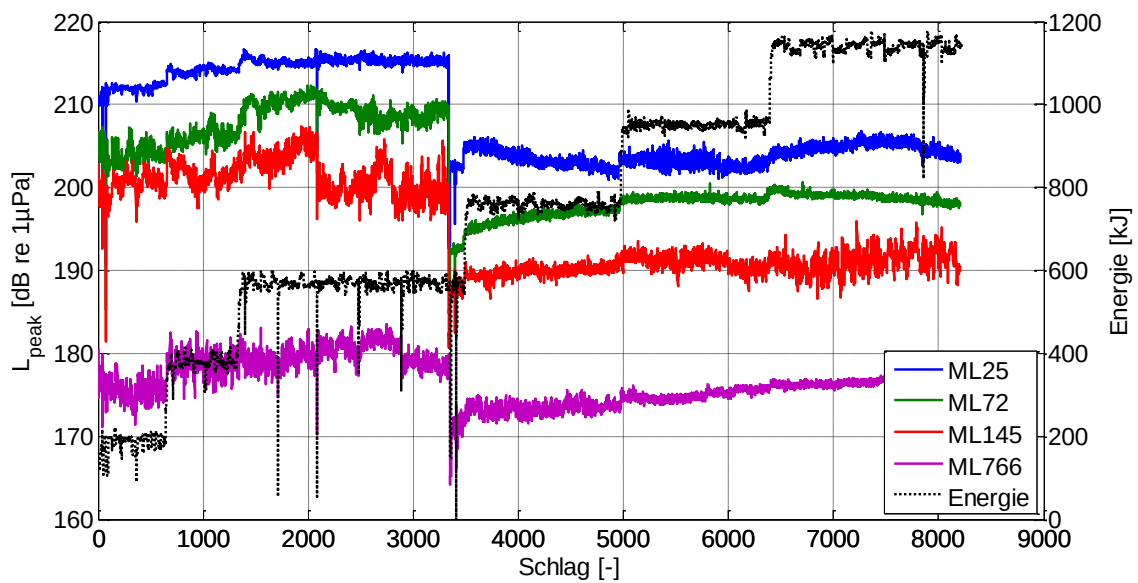
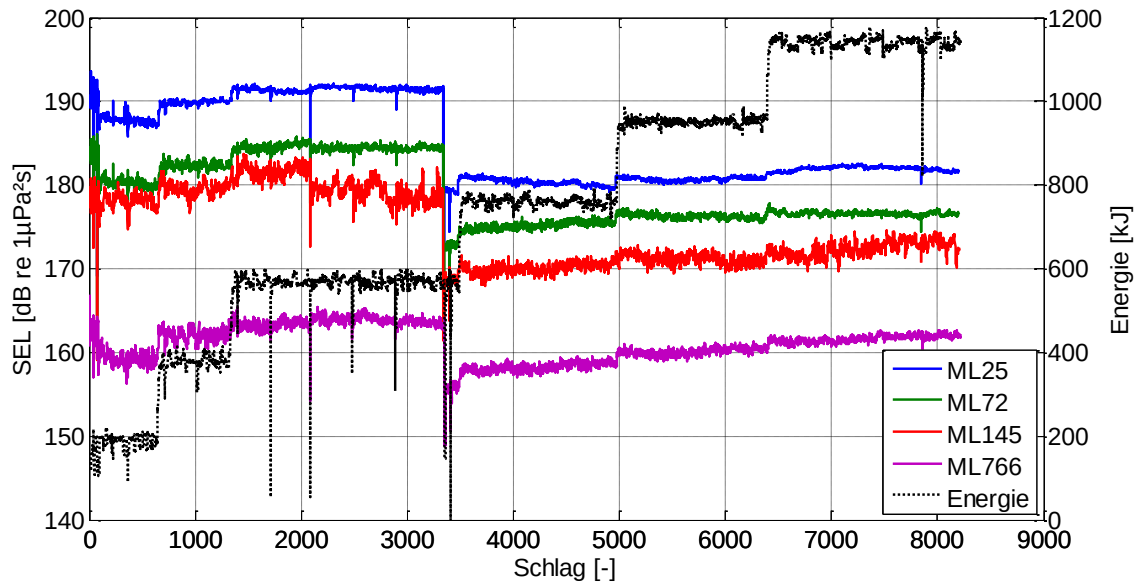
ML145: obere rote Linie

ML250: untere rote Linie

Pfahl: 4
Schallminderungssysteme: HSD + BBC
Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 3300



Pfahl: 5
 Schallminderungssysteme: HSD + BBC
 Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 3350



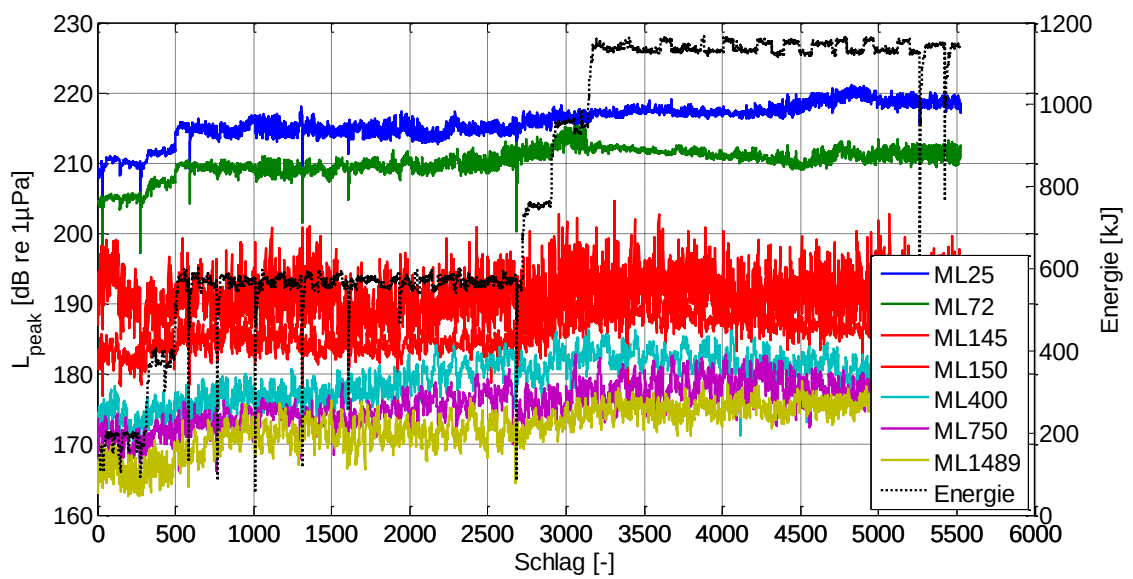
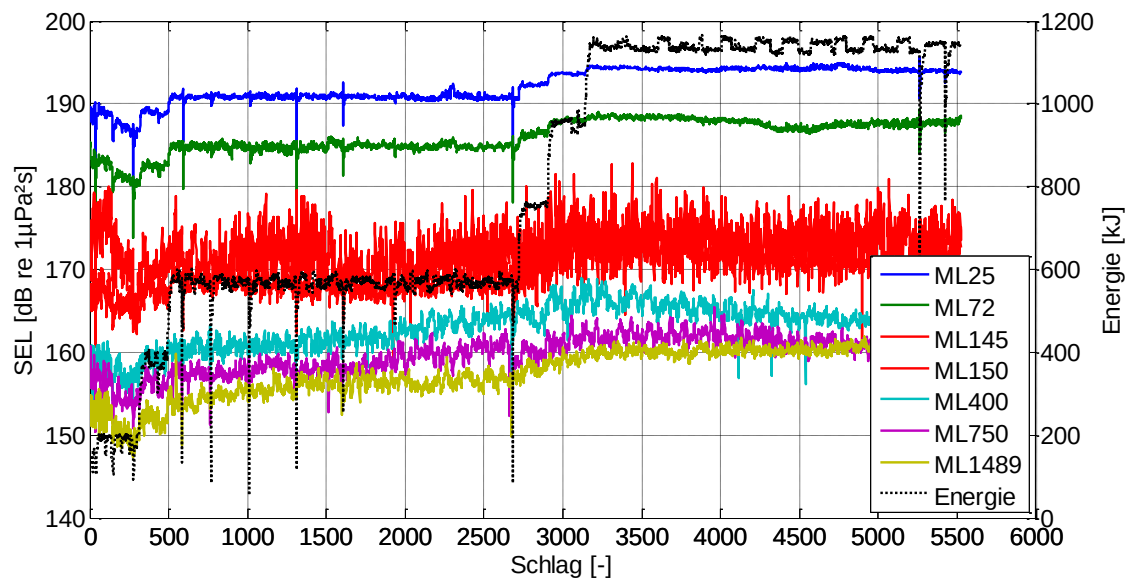
Der Rückgang und die Streuung der Schallpegel an ML145 in Phase 1 ab ca. Schlag 2000 ist darauf zurückzuführen, dass die Hydrophone teilweise außerhalb BBC lagen.

Pfahl:

6

Schallminderungssystem:

BBC



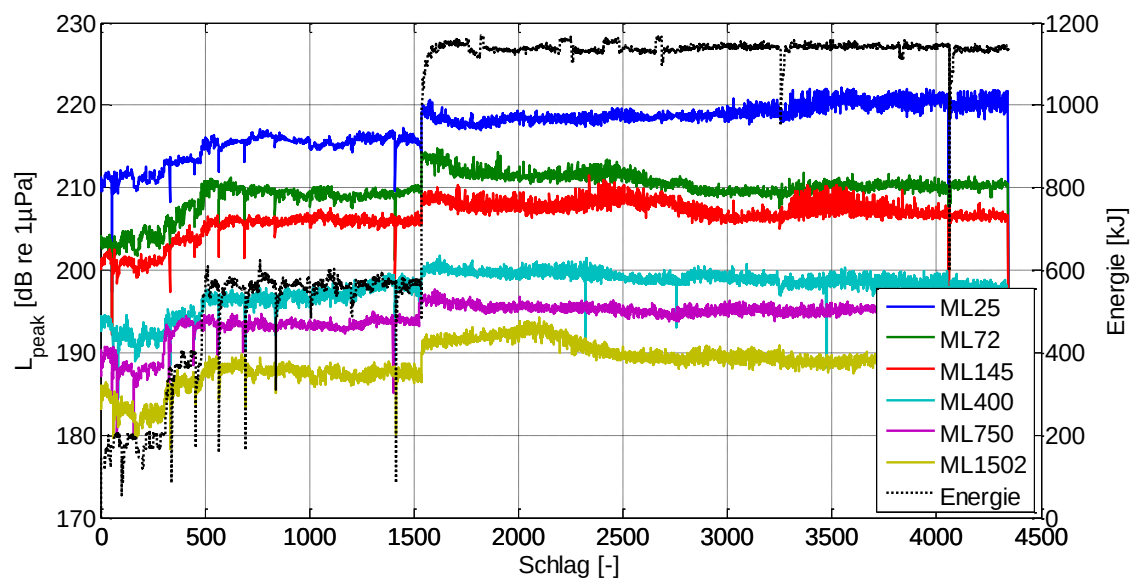
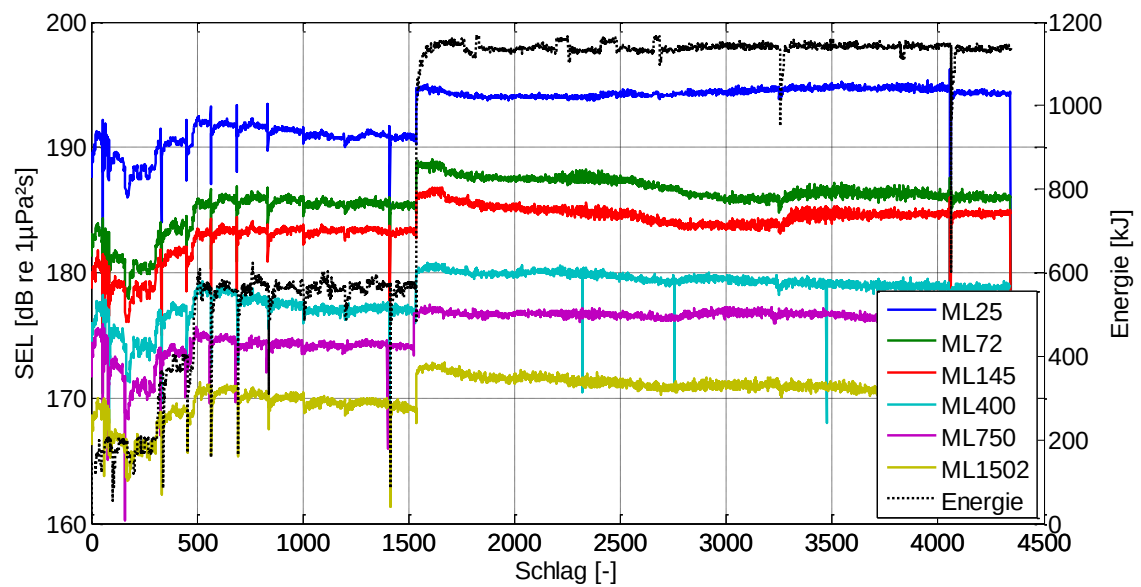
Die niedrigen Schallpegel und die große Streuung an ML145 sind auf die Lage des BBC zurückzuführen. Die Hydrophone an ML145 lagen außerhalb BBC. Es ergeben sich die gleichen Randbedingungen und ähnliche Pegel wie bei ML150.

Pfahl:

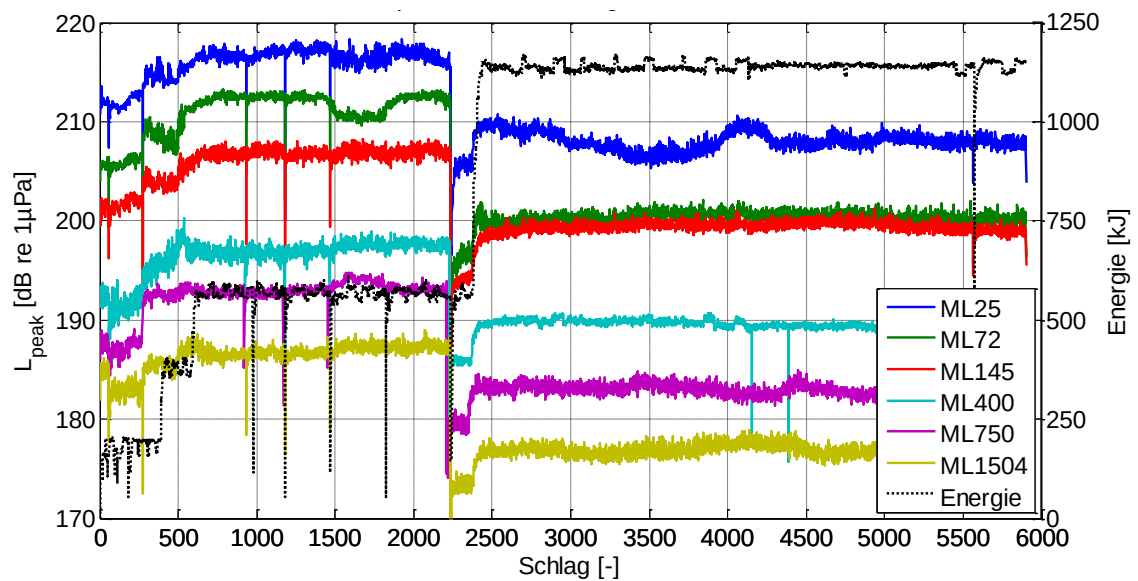
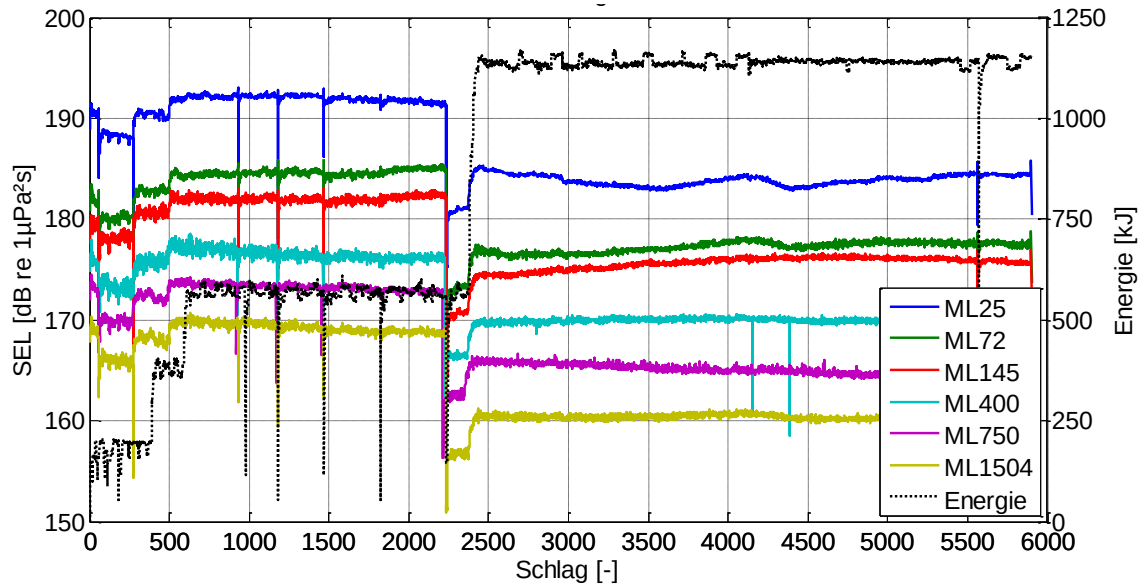
7

Schallminderungssysteme:

keine (Referenzmessung)



Pfahl: 8
Schallminderungssystem: HSD
Einsatz HSD-System in Phase 2: ab Schlag 2236

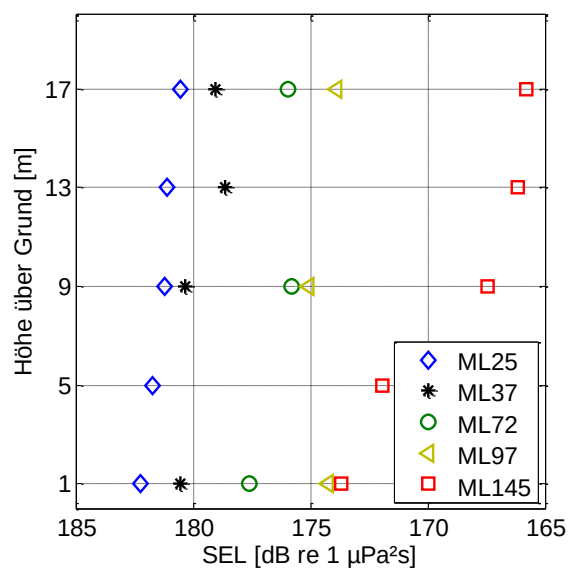


Anhang B SEL über die Tiefe

Im Folgenden ist der SEL über die Tiefe für die Messlokationen im Nahbereich an den untersuchten Pfählen bei einer Rammenergie von ca. 1140 kJ dargestellt.

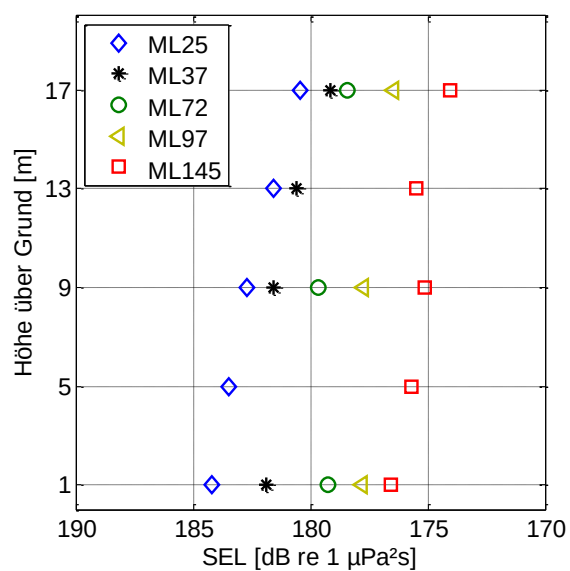
Pfahl: 1

Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC



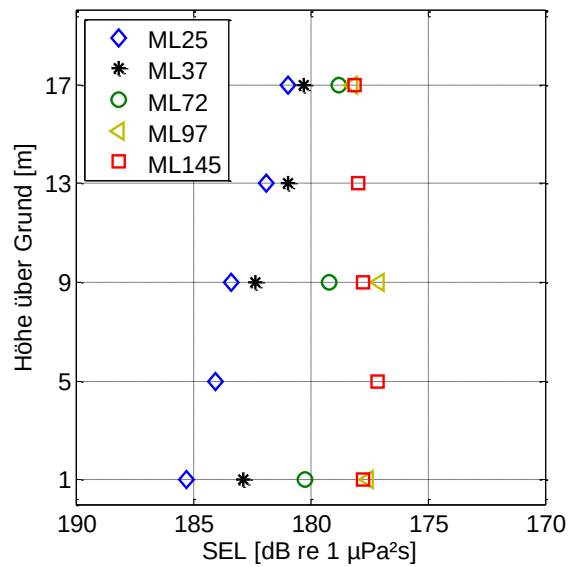
Pfahl: 2

Schallminderungssysteme: HSD + BBC



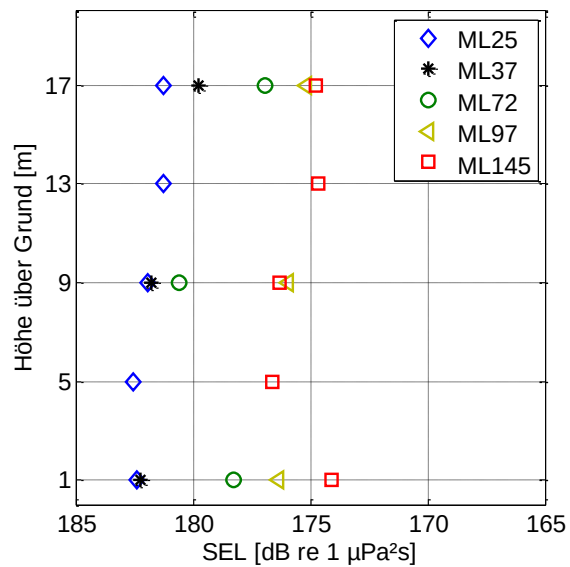
Pfahl: 3

Schallminderungssysteme: HSD + BBC + DBBC

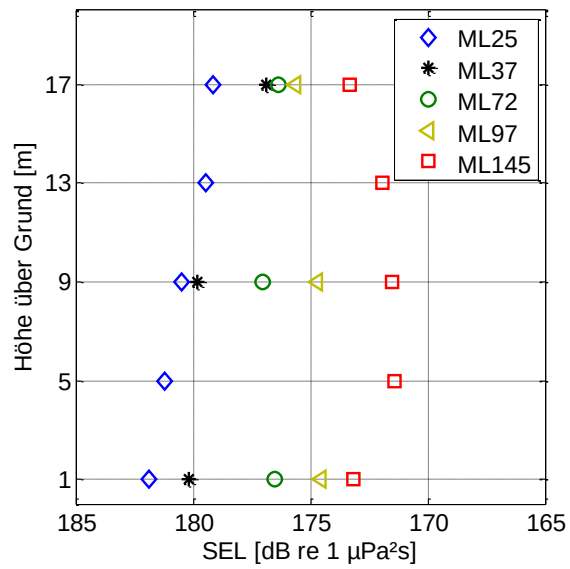


Pfahl: 4

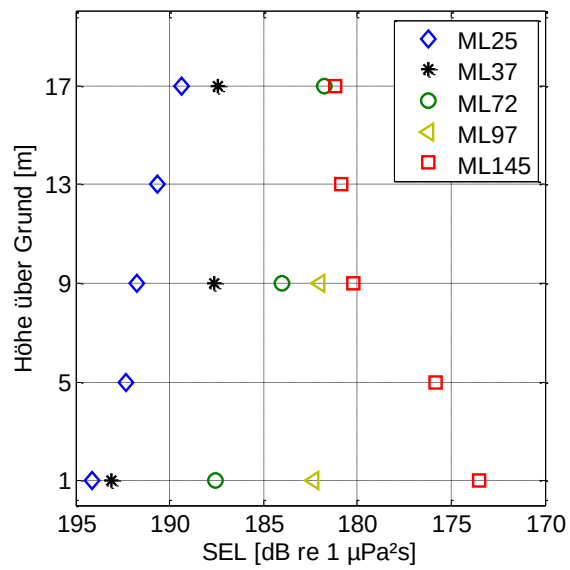
Schallminderungssysteme: HSD + BBC



Pfahl: 5
Schallminderungssysteme: HSD + BBC

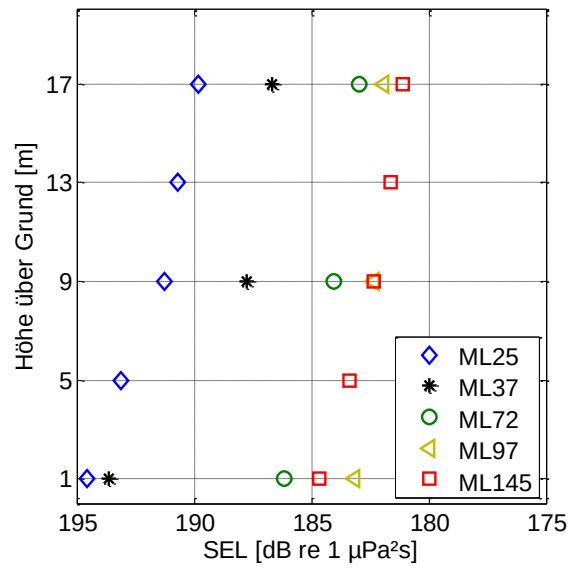


Pfahl: 6
Schallminderungssystem: BBC



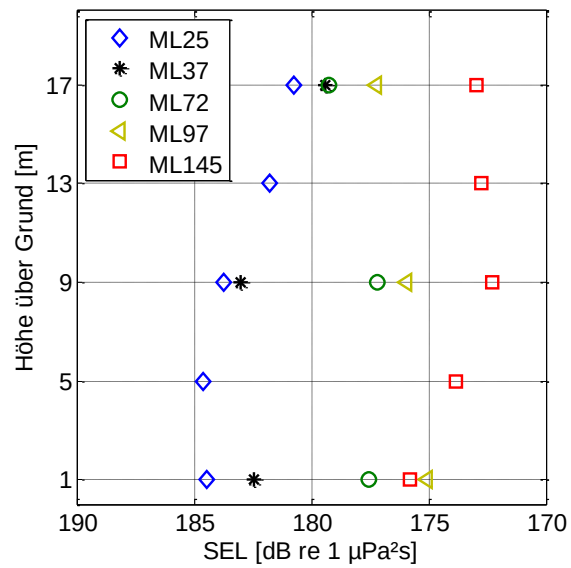
Pfahl: 7

Schallminderungssysteme: keine (Referenzmessung)



Pfahl: 8

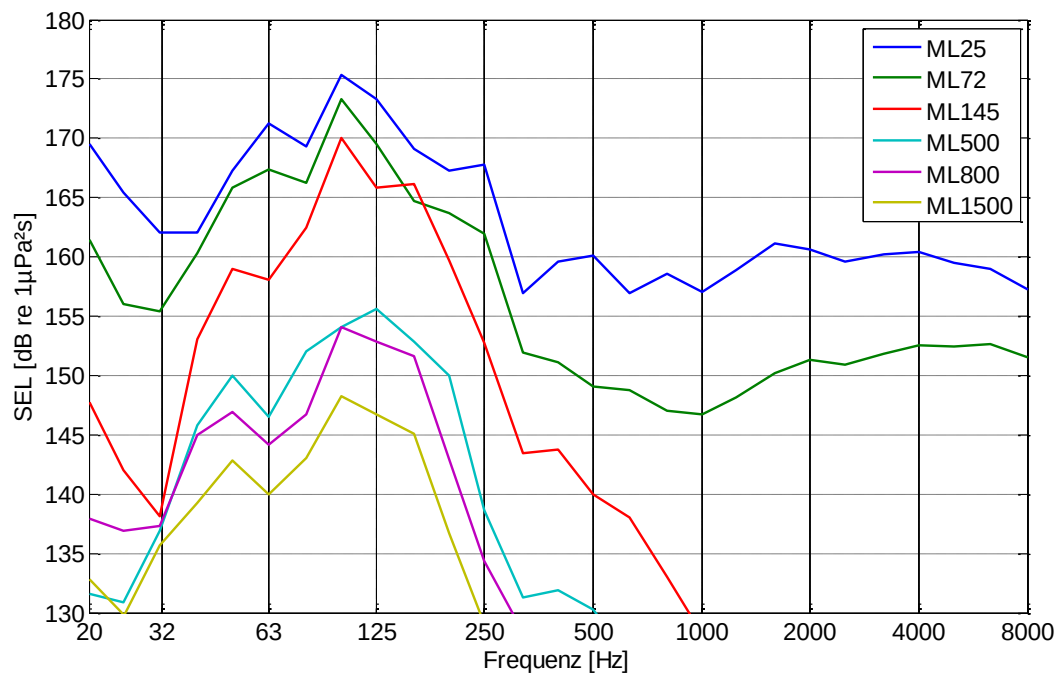
Schallminderungssystem: HSD



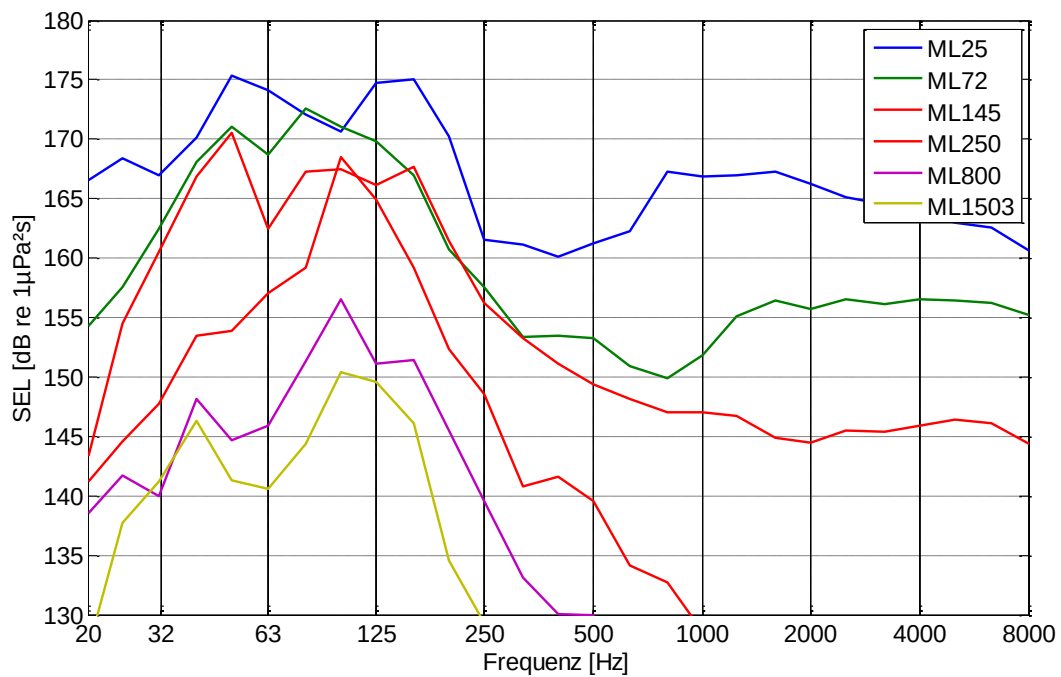
Anhang C Terzanalysen

Im Folgenden sind die Terzspektren der untersuchten Pfähle an verschiedenen Messlo-
kationen ermittelt in 1 m über dem Meeresboden bei 1140 kJ Ramm-
energie dargestellt.

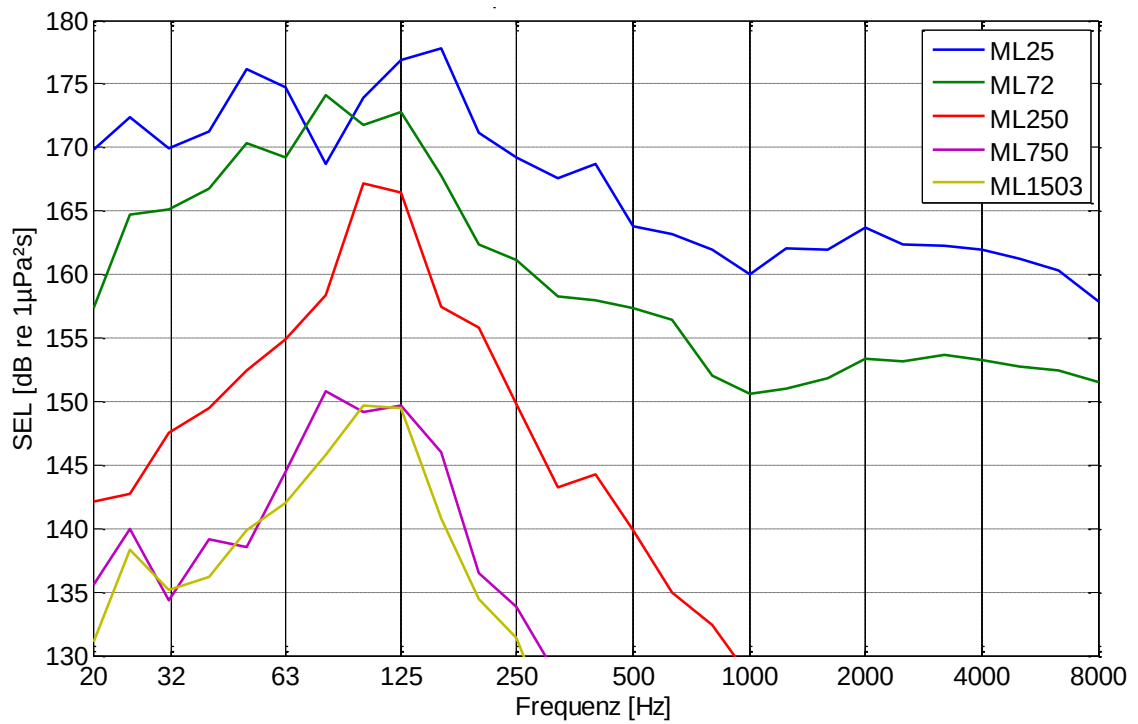
Pfahl 1



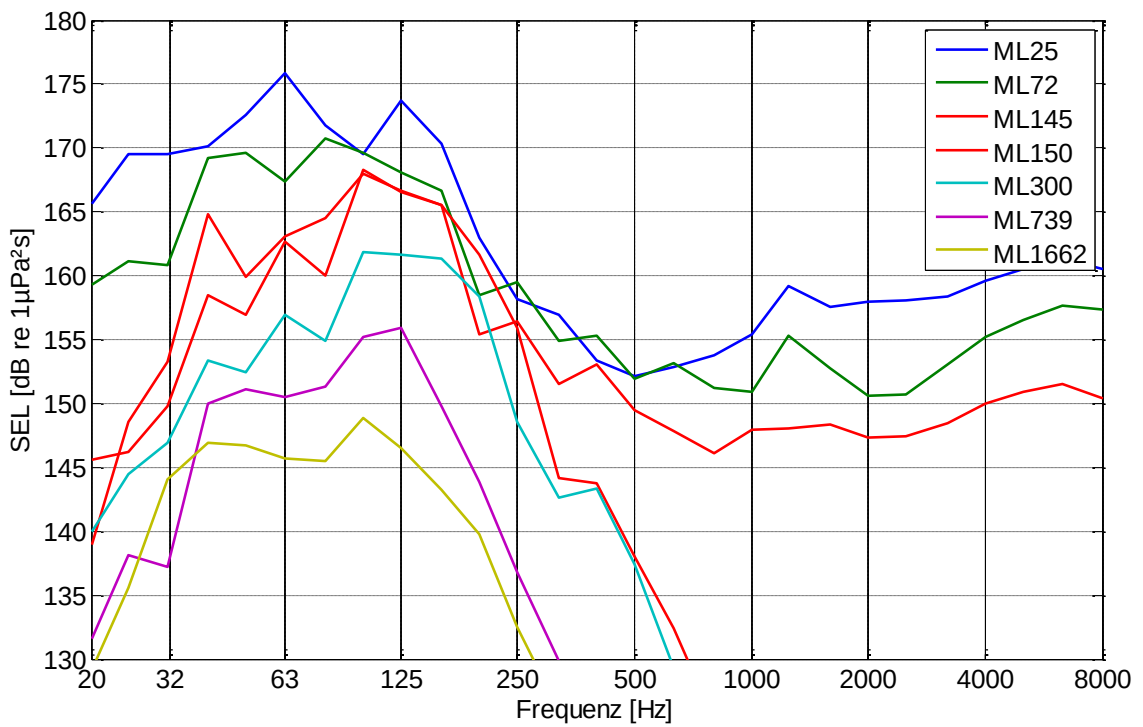
Pfahl 2



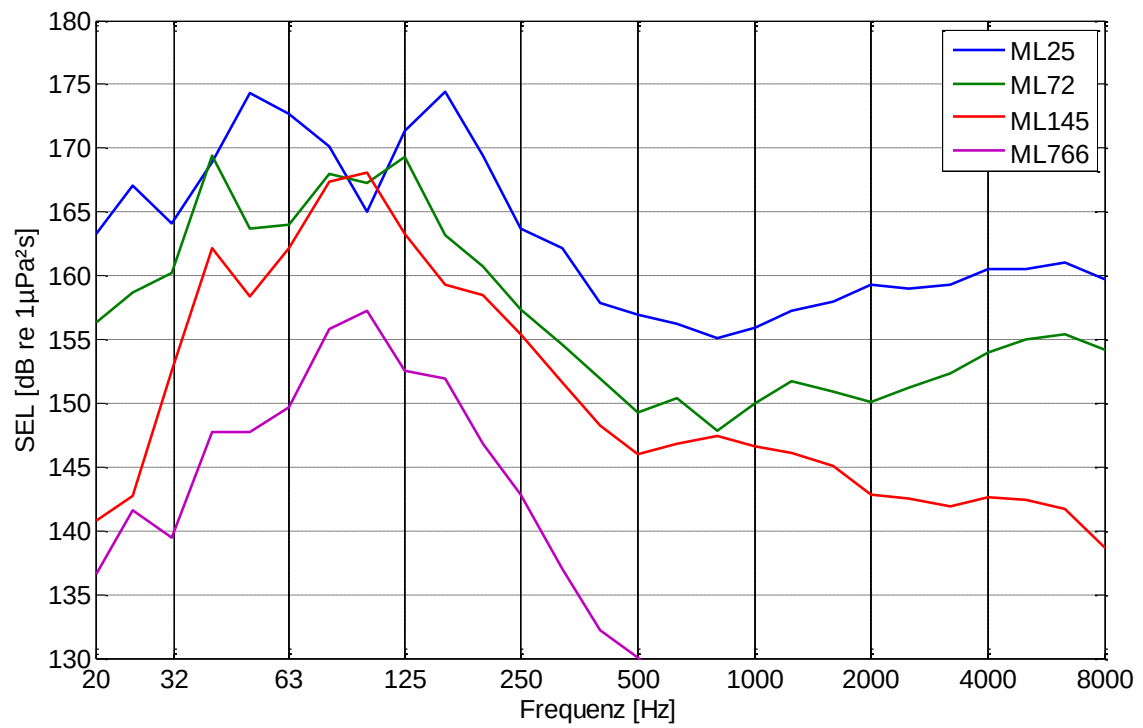
Pfahl 3



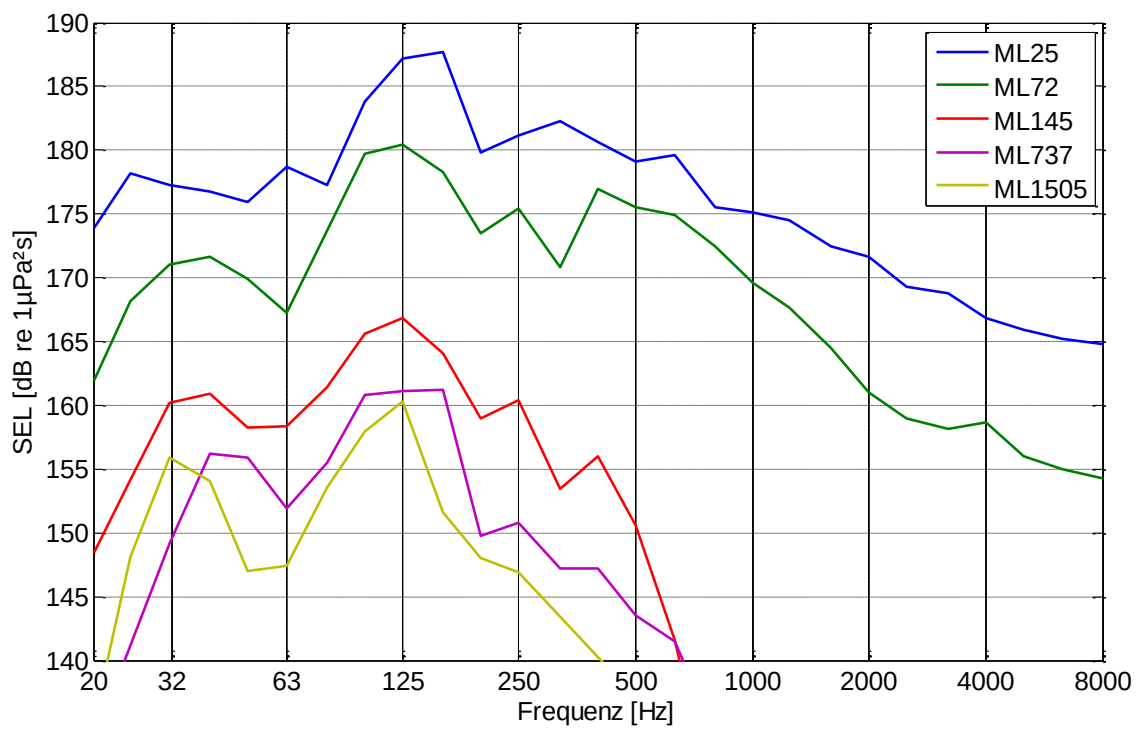
Pfahl 4



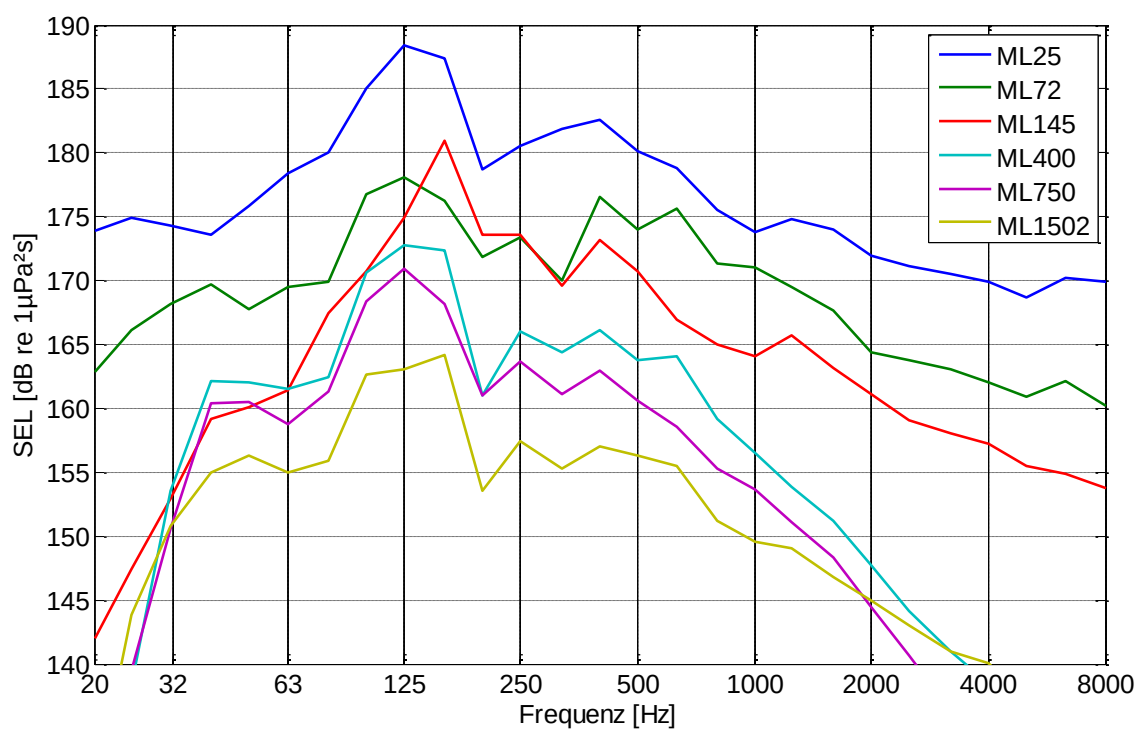
Pfahl 5



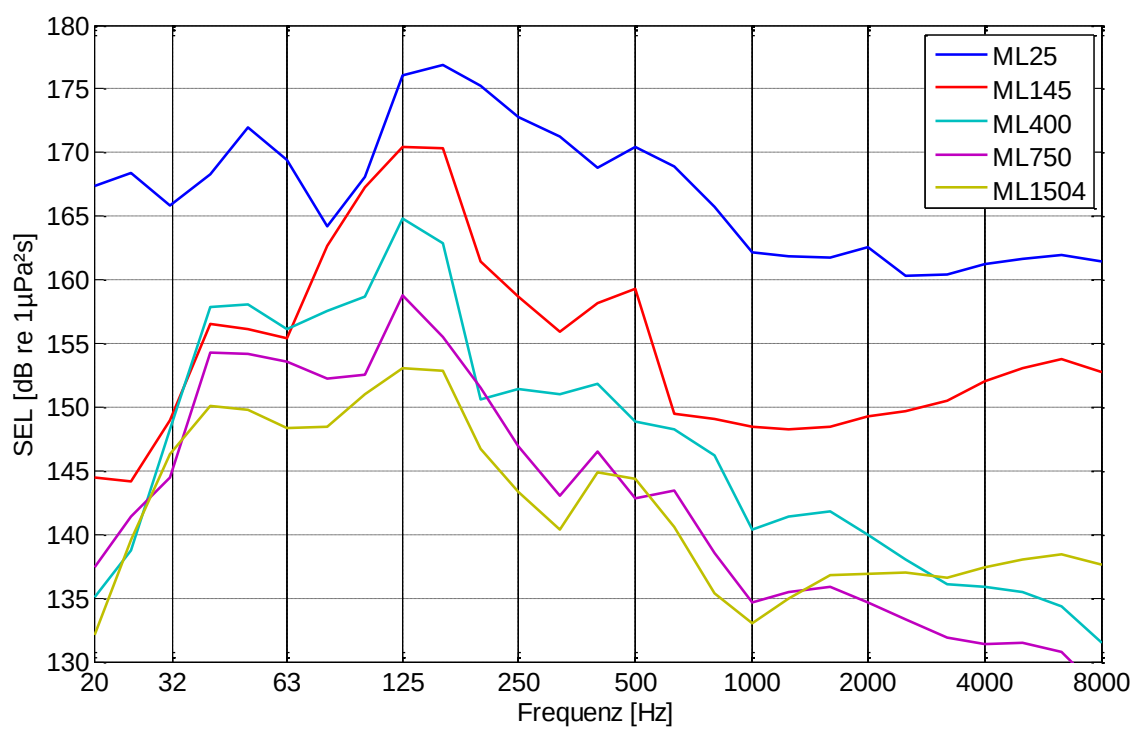
Pfahl 6



Pfahl 7



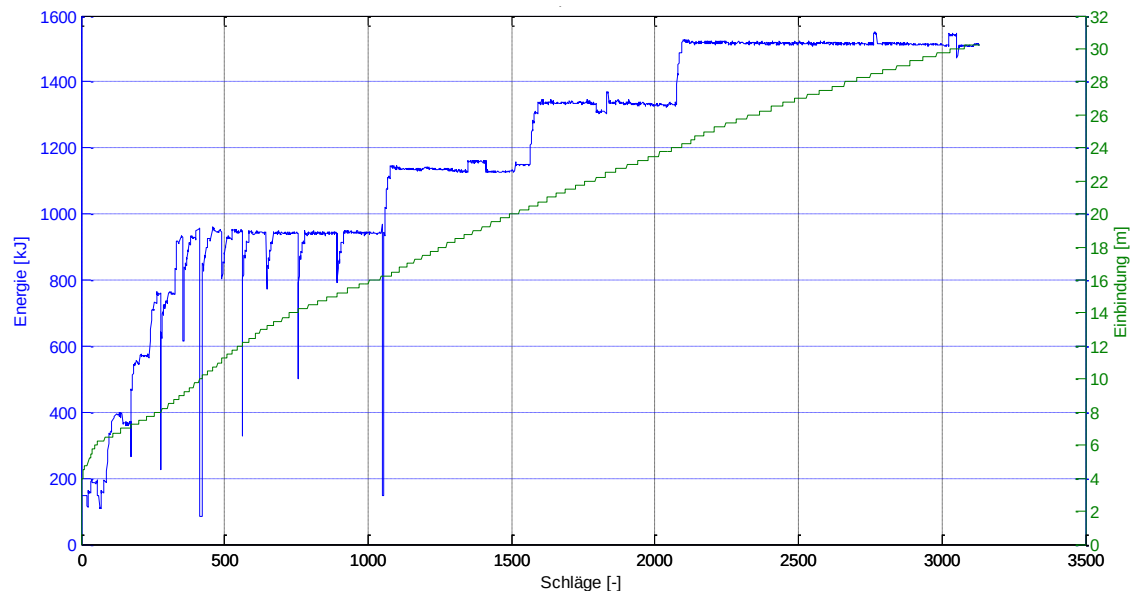
Pfahl 8



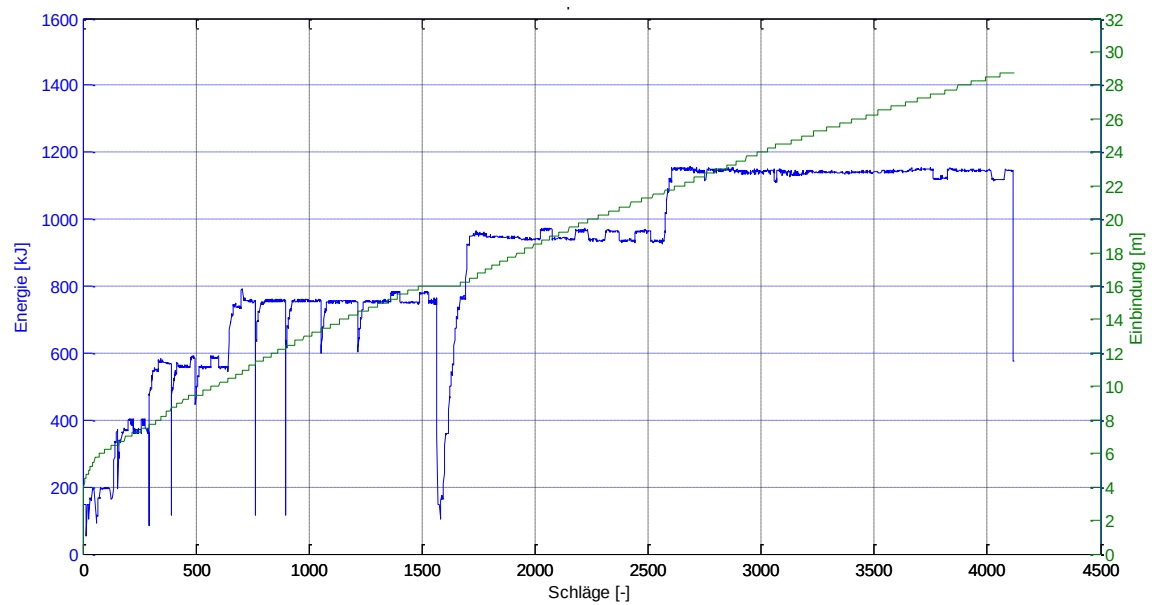
Anhang D Rammprotokolle

Die folgenden Darstellungen wurden auf Grundlage der Daten der Rammprotokolle der Fa. Menck erstellt.

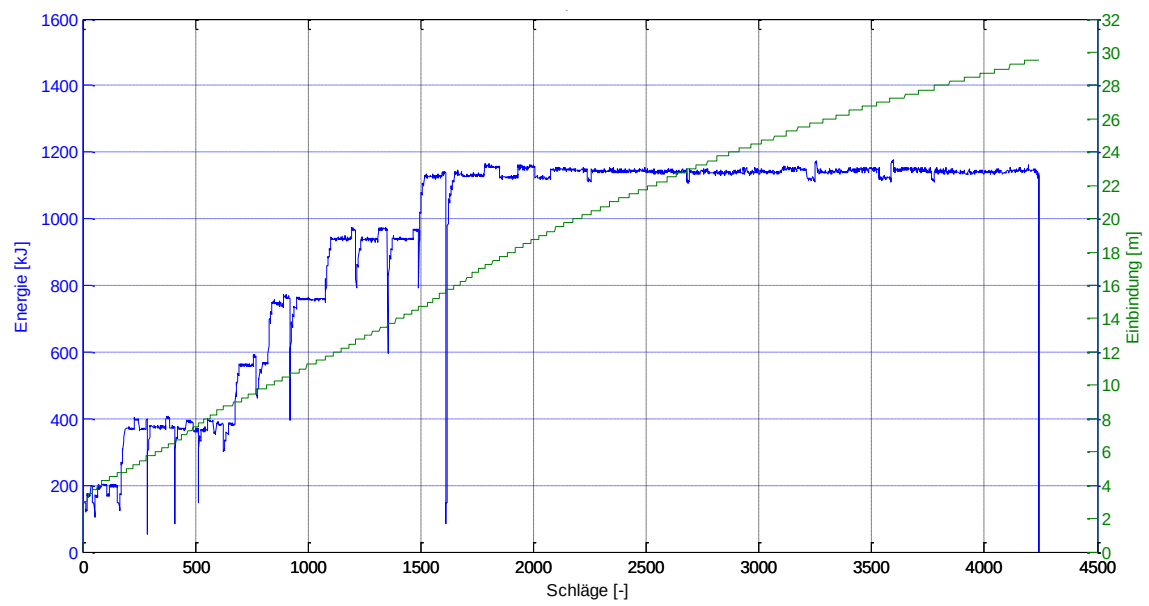
Pfahl 1



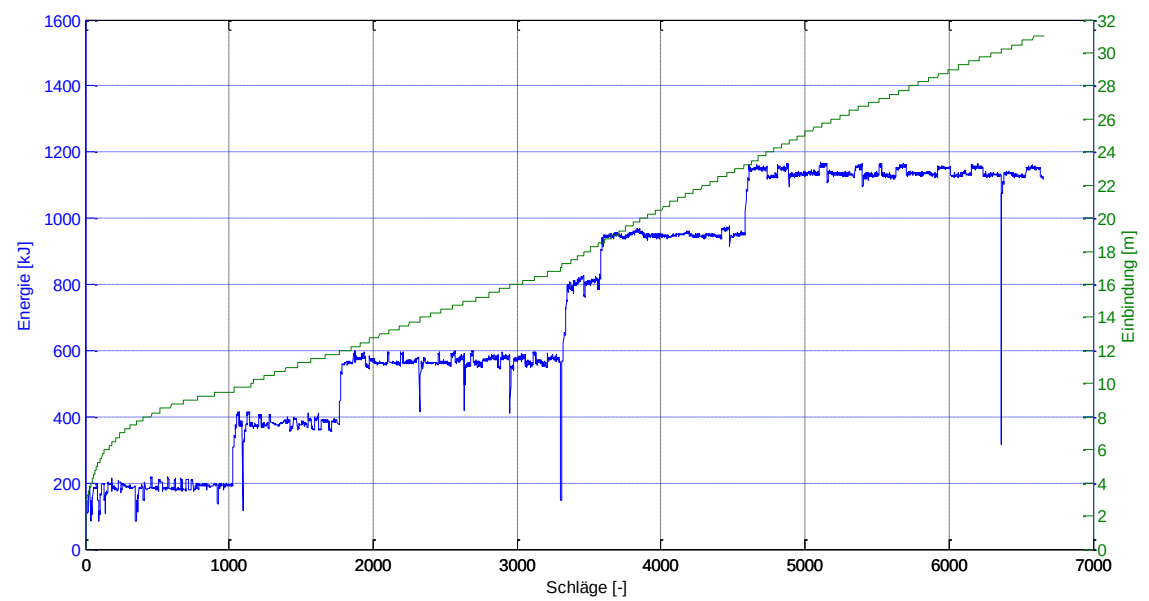
Pfahl 2



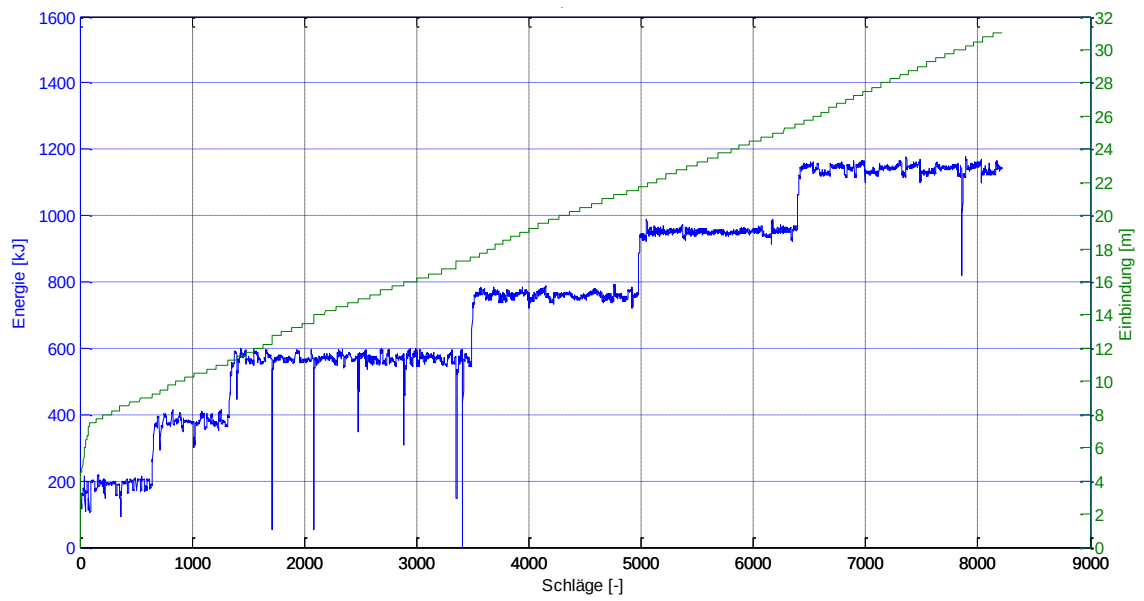
Pfahl 3



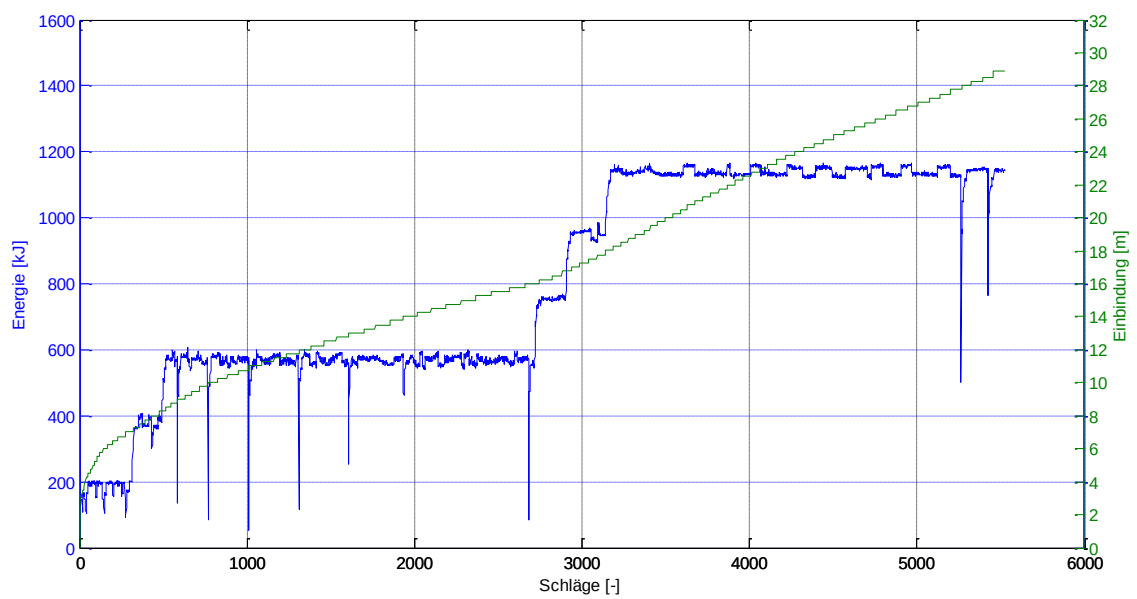
Pfahl 4



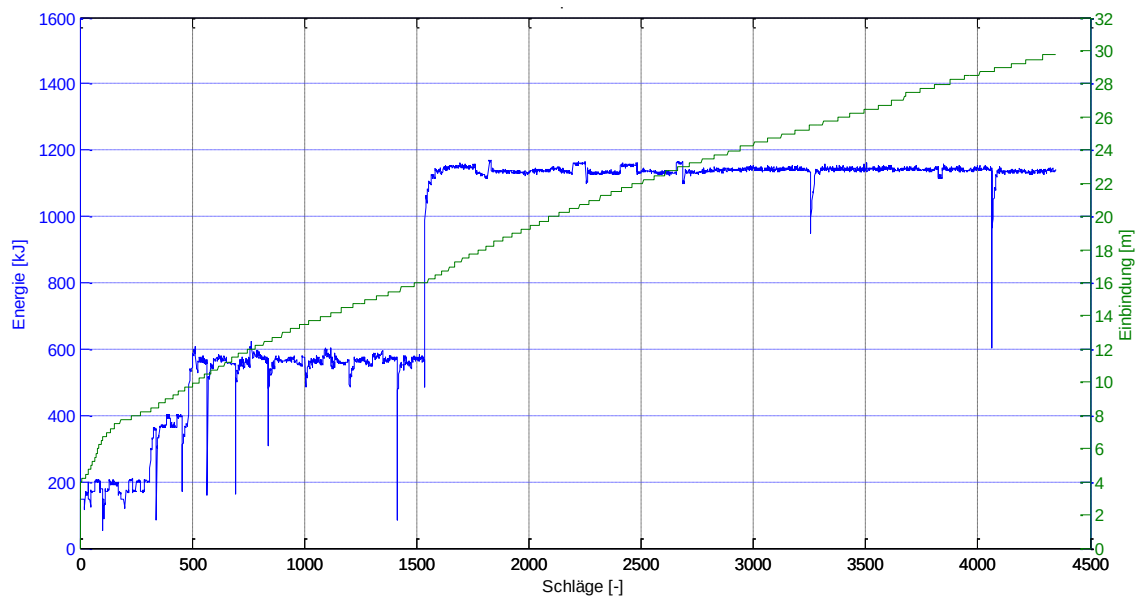
Pfahl 5



Pfahl 6



Pfahl 7



Pfahl 8

