

Hydroschallmessungen beim Bau von Offshore-Windparks: Anforderungen an die Messsensorik aus der Praxis und aus dem Genehmigungsverfahren – ein Widerspruch ? -

Michael A. Bellmann und P. Remmers

itap – Institut für technische und angewandte Physik GmbH

1 Einleitung

Durch die angestrebte Energiewende ist in den letzten Jahren der Ausbau regenerativer Energiequellen politisch wie auch wirtschaftlich in der Bundesrepublik Deutschland stark vorangetrieben worden. Ein nicht unerheblicher Anteil des für die Energiewende benötigten Strombedarfs soll durch den Ausbau von Offshore-Windparks gedeckt werden. Das Ziel sind 30 GW im Jahr 2030, von denen zu Beginn 2013 gerade mal 280 MW am Netz angeschlossen waren. Ende 2013 befanden sich weitere sieben Offshore-Windparks im Bau.

Für den Bau dieser Offshore-Windparks gelten seitens der Genehmigungsbehörde strenge Auflagen in Bezug auf Umweltverträglichkeit bei der Erstellung und dem späteren Betrieb dieser Anlagen. So werden vom BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) im Standarduntersuchungskonzept (StUK 4; BSH, 2013) sowohl während des Baus als auch während des späteren Betriebes umfangreiche Hydroschallmessungen gefordert. Hintergrund ist, dass Schalleinträge ins Wasser (Hydroschall), z. B. durch Impulsrammungen, einen erheblichen Einfluss auf die marine Tierwelt besitzen können. So können beispielsweise marine Säugetiere nicht nur durch Schall belästigt oder vertrieben werden, sondern temporäre oder permanente Hörschäden können durch laute Schalleinwirkungen nicht ausgeschlossen werden.

Im Rahmen dieser Studie werden der Umfang der notwendigen Hydroschallmessungen bei einem Bau eines Offshore-Windparks mit den gängigen schallintensiven Ereignissen dargelegt, um die Anforderungen an die Messsensorik seitens des Genehmigungsverfahrens den technischen Erfahrungen aus der Praxis gegenüber zu stellen.

2 Bauablauf und damit verbundene schallintensive Arbeitsschritte

Die Bauphase eines Offshore-Windparks (OWP) besteht normalerweise aus drei Arbeitsschritten: (i) Verkehrssicherung des Plangebietes, (ii) Installation der Gründungsstrukturen und (iii) Installation der Windenergieanlagen (WEA) inkl. Netzanbindung.

(i) Bei der Verkehrssicherung des Plangebietes werden zunächst die Eckpunkte inkl. Sicherheitszone mittels Kardinalbojen abgegrenzt und für den öffentlichen Schiffsverkehr gesperrt. Die einzigen dabei entstehenden Hydroschallemissionen gehen von dem Schiffsverkehr aus und sind i. d. R. als nicht schädlich einzustufen.

(ii) Die derzeit gängige Praxis für die Herstellung der Fundamentstrukturen für die WEAs und parkinternen Umspannstationen ist das Impulsrammverfahren. Bei diesem Verfahren werden Stahlfundamente in Form von Pfählen durch die Verwendung von Rammhämmern in das Sediment eingeschlagen. Dabei entstehen sehr hohe Schallemissionen, die u. a. vom Pfahldurchmesser, der Installationsart (pre- oder post-piling), der max. Rammenergie und der Sedimentschichtung abhängig sind, Abbildung 1.

(iii) Die Installation der Windenergieanlagen und die Verkabelung erfolgen durch den Einsatz von Schiffen; entsprechend zu Punkt (i).

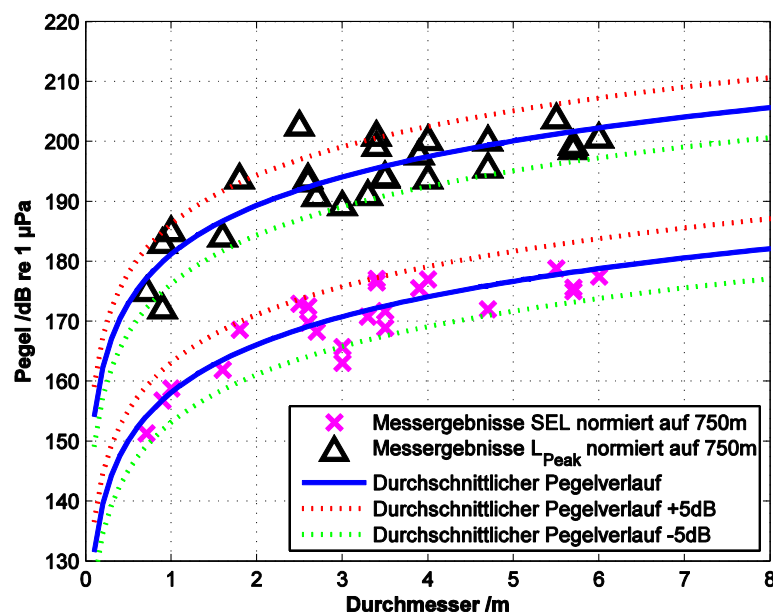


Abbildung 1: Gemessene Spitzenpegel (L_{peak}) und breitbandige Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E) bei Rammarbeiten diverser OWPs als Funktion des Pfahldurchmessers normiert auf eine Entfernung von 750 m zur Rammbaustelle.

3 Notwendige Messungen der Hydroschallemissionen und – immissionen im Rahmen der StUK 4

Derzeit existiert keine (inter-) nationale Norm für die Durchführung und Beurteilung von derartigen Hydroschallmessungen bei schallintensiven Arbeiten an OWPs.

Die aktuelle Revision des Standarduntersuchungskonzeptes (StUK 4) mit ihren mitgeltenden Messvorschriften für Unterwasserschallmessungen (2011, 2013) ist auf nationaler Ebene im Genehmigungsverfahren entwickelt worden und besitzt in ihrem Umfang weltweit ein Alleinstellungsmerkmal. Die StUK 4 regelt u. a. den kompletten Umfang der durchzuführenden Hydroschallmessungen während des Baus eines OWPs seitens des Genehmigungsverfahrens. Zudem werden sämtliche Anforderungen an die Messsensorik, Analysemethoden und Darstellung der Messergebnisse definiert, die im Folgenden zusammengefasst sind.

3.1.1 Messgeräte

Die Anforderungen an die zu verwendende Messsensorik, die Auswertungssoftware und das Messinstitut nach StUK 4 sind:

- Hydrophon (mit Vorverstärker) mit einer Abweichung der Empfindlichkeit von < 2 dB bis zu 40 kHz, sowie omnidirektionale Richtcharakteristik
- Analoges Hochpassfilter zur Begrenzung der tieffrequenten Dynamik
- Anti-Aliasing Filter; Frequenzbereich: 10 Hz bis 20 kHz
- Kalibrierungsintervall gemäß Herstellerangaben: 24 Monate
- Messhöhe des Hydrophons über Grund: 2 – 3 m
- Begleitparameter dokumentieren: u. a. Wassertiefe, GPS-Koordinaten, Bodenbeschaffenheit, sowie typische Parameter für den jeweiligen Arbeitsschritt, z. B. Rammprotokolle während der Bauphase
- Datenformat für Übermittlung an Genehmigungsbehörde: Windows PCM WAVE mit 24-bit Auflösung
- Messinstitut: Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025
- Messung eines Schallgeschwindigkeitsprofils; einmalig (CTD-Sonde)

3.2 Messumfang

3.2.1 Basisaufnahme

Vor dem Baubeginn eines OWPs sind die allg. Hintergrundgeräusche zu messen. „Hintergrundgeräusche sind die Summe aller natürlichen Geräusche [...], d. h. ohne Baugeräusche. In der Umgebung des Vorhabens vorhandene Geräusche entfernter

Schiffe oder Geräusche aus dem Betrieb benachbarter Windenergieanlagen sind den Hintergrundgeräuschen zuzurechnen“ (StUK 4). Diese sind an mindestens drei Messpositionen durchzuführen: im Vorhabensgebiet, im nächstgelegenen Naturschutzgebiet (FFH-Gebiet) und in ca. 5.000 m Entfernung zum Vorhabensgebiet. Gängige Praxis in Abstimmung mit dem BSH ist die Durchführung von mindestens zwei Messpositionen (im Vorhabensgebiet und im Naturschutzgebiet).

3.2.2 Bauphase

„Während geräuschintensiver Bauarbeiten (z. B. Rammarbeiten) sind Hydroschallmessungen in der Umgebung der Baustelle durchzuführen. Insbesondere ist die Effizienz schallmindernder Maßnahmen zu prüfen.“ (StUK 4). Gängige Praxis ist derzeit, zeitgleiche Hydroschallimmissionsmessungen parallel an drei Standorten (in 750 m und in 1.500 m Entfernung von der jeweiligen Baustelle, sowie im nächstgelegenen Naturschutzgebiet außerhalb des Baufeldes) bei jeder schallintensiven Bautätigkeit durchzuführen.

3.2.3 Betriebsphase

Nach Inbetriebnahme ist eine Kontrolle der Hydroschallimmissionen in der Umgebung des OWPs durchzuführen. Die Messungen sind parallel an vier Positionen notwendig: in 100 m Entfernung einer WEA, in der Mitte des OWPs, ca. 1.000 m außerhalb des OWPs und im nächstgelegenen Naturschutzgebiet.

Die Messungen müssen über drei Leistungsbereiche: „niedrig“, „mittel“ und „Nennleistung“ erfasst werden, wobei für jeden Leistungsbereich eine auswertbare Messdauer von mindestens 3 Stunden erforderlich ist. Zudem sollte eine Messung bei vollständiger Abschaltung des gesamten Windparks erfolgen (StUK 4, 2013).

3.3 Richt- und Grenzwerte für Hydroschall

3.3.1 Basisaufnahme (Hintergrundgeräusch)

Für die Beurteilung des Hintergrundgeräusches gibt es derzeit keine Richt- oder Grenzwerte. Die Ergebnisse werden in Form von Pegelstatistiken dargestellt und

dienen der anschließenden Beurteilung der Messergebnisse aus der Bau- und Betriebsphase hinsichtlich der erhöhten Schalleinträge ins Wasser.

3.3.2 Bauphase (Rammschall)

Vom BSH wurde auf Grundlage von Vorarbeiten des Umweltbundesamtes ein Richtwert für schallintensive Arbeiten, wie z. B. Rammschall, festgelegt (2007). Dieser Lärmschutzwert ist als duales Kriterium mit $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ für den Einzelereignispegel (SEL bzw. L_E) und $190 \text{ dB}_{L_{\text{peak}}}$ für den Spitzenpegel (L_{peak}) in einer Entfernung von 750 m definiert (jeweils Einzahlwerte). Durch die Festlegung des o. g. dualen Kriteriums soll einer potenziellen Schädigung von schützenswerten Schweinswalen (TTS – temporal threshold shift) und anderen marinen Säugetieren vorgebeugt werden. Der Lärmschutzwert wurde zunächst als Richtwert definiert und wird bei derzeitigen Bauvorhaben zunehmend als Grenzwert in den Genehmigungsaufgaben hinterlegt. Bei Nichteinhaltung des Lärmschutzwertes sind schallmindernde Maßnahmen wie z. B. der Einsatz von Schallschutzsystemen zwingend vorgeschrieben.

3.3.3 Betriebsphase

Für die Betriebsphase existieren derzeit ebenfalls keine standardisierte Beurteilung bzw. Richtwerte. Die Schalleinträge durch den Betrieb von Windenergieanlagen sind relativ gering und heben sich nicht deutlich von den Hintergrundgeräuschmessungen ab. In der Regel werden die gemessenen Hydroschallimmissionen den Messungen bzgl. des Hintergrundgeräusches gegenüber gestellt.

4 Anforderungen aus der Praxis und technische Umsetzung

4.1 Hydroschallmessgerät der itap GmbH

4.1.1 Allgemeine Systembeschreibung

Für die Aufzeichnung des Hydroschalls werden autonome abgesetzte Messsysteme eingesetzt (Eigenentwicklung). Die Abbildung 2 zeigt ein Foto sowie eine schematische Darstellung eines solchen Messsystems inkl. einer möglichen Verankerung.

Das eigentliche Messgerät besteht aus einem Tauchkörper, der zeitgleich als Gewichtsanker dient, und einem bzw. zwei angeschlossenen Hydrophonen.

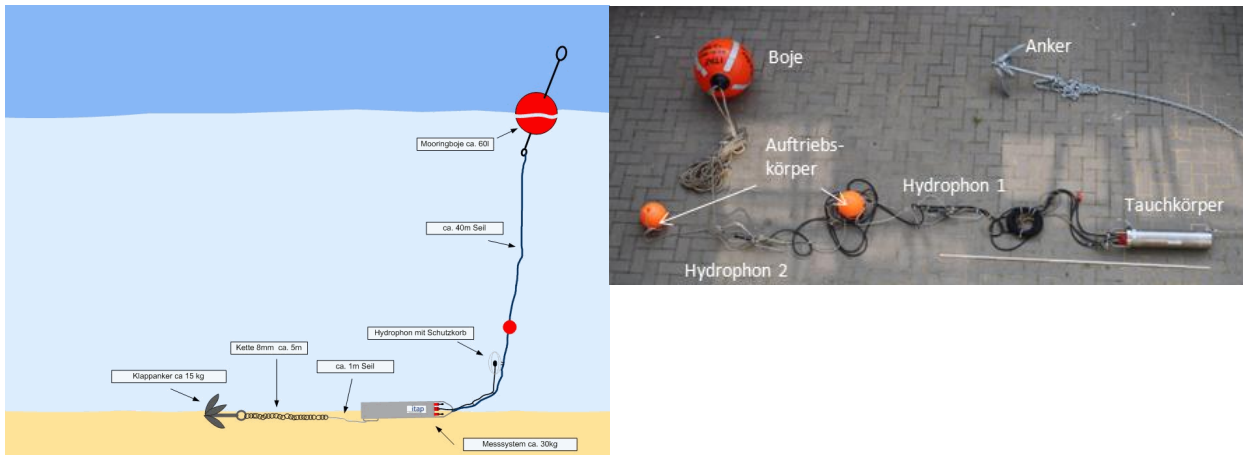


Abbildung 2: Links: Schematische Darstellung eines (einkanaligen) Messsystems inkl. Verankerung. Rechts: Foto eines autonom abgesetzten Messgerätes mit Verankerung und Markierung in einer zweikanaligen Hydrophon-Ausführung der itap GmbH.

Die Stromversorgung, die Messwerterfassung und sämtliche zusätzlichen elektronischen Bauteile befinden sich im Tauchkörper. Das notwendige Verankerungs- und Markierungssystem kann, je nach den Bedürfnissen der Anwendung, variabel ausgelegt werden (Abbildung 2 und 3). Das Messsystem wird dabei offshore positioniert und ist in der Lage ohne Wartung oder weitere manuelle Bedienung den Hydroschall über einen längeren Zeitraum autonom aufzuzeichnen (Kapitel 4.1.2).

4.1.2 Einstellmöglichkeiten (Datenformat)

Das Messsystem erfasst die Zeitsignale („Tonbandaufzeichnung“) der von den Hydrophonen erfassten Hydroschallereignissen.

Die wesentlichen technischen Spezifikationen des Hydroschallmessgerätes sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Einstellungsmöglichkeiten des Hydroschall-Messsystems der itap GmbH

Parameter	Beschreibung
Aufnahmeformat	PCM WAVE oder MP3* ¹ ; 16 / 24 bit; mono oder stereo
Samplingfrequenz	44.100 Hz / 48.000Hz
Aufnahmedauer	Abhängig von gewähltem Format: 50 h bis 5 Wochen
Dynamikbereich	Abhängig vom ausgewählten Hydrophon. i. d. R. 80 dB mit einstellbarer unterer Grenze zwischen 70 dB und 230 dB re. 1 µPa
Verankerungssystem	Je nach Anwendungsgebiet variabel (Kapitel 4.1.3, Abbildung 3)

*¹ MPEG1 Audio Layer 3 nach ISO IEC 11172 3 (Kodierungsraten 32, 64 oder 96 kps pro Kanal)

Das eingesetzte Hydrophon ist, je nach Einsatzgebiet und Aufgabenstellung, frei wählbar und wird mit einer wasserdichten Steckverbindung mit der elektronischen Einheit im Tauchkörper verbunden. Somit können mit unterschiedlichen Hydrophonen und derselben elektronischen Aufnahmeeinheit Hydroschallmessungen im Pegelbereich von 70 dB (Hintergrundgeräusche) bis hin zu 230 dB re 1 μ Pa (z. B. Rammschall) aufgezeichnet werden.

Das digitalisierte Hydrophonsignal kann auf verschiedene Arten gespeichert werden. Beim MP3 Verfahren macht man sich zur Datenkompression, unter anderem, folgende psychoakustische Gesetzmäßigkeiten zunutze:

1. Beschränkung des Frequenzbereichs auf maximal etwa 18 kHz
2. "Unhörbare" Anteile des Signals werden mit verminderter Genauigkeit dargestellt.
3. Effiziente verlustfreie Kompression (Huffman-Codierung) der Daten.

Zu Punkt 2 wird im MP3-Algorithmus ein psychoakustische Modell verwendet, das vor allem den Effekt der Verdeckung bzw. Maskierung ausnutzt. Vereinfacht bedeutet dies, dass leiser Schall bei Vorhandensein von lautem Schall (dem Maskierer) verdeckt, also unhörbar wird (Zwicker & Fastl, 1999). Der Grad der Komprimierung und der damit verbundene Verlust an Genauigkeit sind einstellbar (Tabelle 1).

4.1.3 Verankerungssysteme

Das Verankerungssystem ist für die Positionierung und gegen eine mögliche Verdriftung aufgrund von z. B. Strömung zwingend erforderlich. Zudem ist i. d. R. eine Oberflächenmarkierung in Form einer Boje oder einer Spiere (mit oder ohne Beleuchtung) notwendig. Die Wahl des geeigneten Verankerungs- und Markierungssystems für die Messgeräte ist von folgenden Faktoren abhängig:

- (i) Einsatzdauer offshore (1 Tag bis max. 8 Wochen)
- (ii) Lage der Messposition: innerhalb oder außerhalb eines gesperrten Baufeldes
- (iii) Schiff für Ausbringung und Bergung
- (iv) (öffentlicher) Schiffsverkehr im Bereich der Messpositionen
- (v) Hydrographische Gegebenheiten, wie z. B. Strömung, Welle, Wassertiefe

In der Abbildung 3 sind mehrere Varianten zusammengefasst. In der deutschen Nord- und Ostsee liegt die mittlere Strömung zumeist unter 2 m/s, so dass schon mit

sehr geringen Gewichtsankern eine sichere Positionierung über kurze Zeiträume erfolgen kann. Ein wesentlicher Faktor bei der Wahl des Verankerungssystems ist die Lage der Messposition und der dort befindliche Schiffsverkehr. Bei Messungen innerhalb einer Baustelle beträgt die Einsatzzeit im Wasser zumeist weniger als 2 Tage und erfolgt zudem nur bei „guten“ Wetterbedingungen. In diesem Fall werden häufig kleine Verankerungsgeschirre verwendet (Abbildung 2). Vorteil dieser kleinen Verankerung ist die sehr einfache Handhabung beim Ausbringen und Einholen der Systeme (Wetterrestriktionen: $h_S \leq 2$ m, Windgeschwindigkeit ≤ 12 m/s; notfalls auch ohne technische Hilfsmittel wie Kran und Winde möglich). Bei Messungen außerhalb des Baufeldes muss das Messsystem durch Anzeige beim BSH und geeigneter (beleuchteter) Oberflächenmarkierung für den Schiffsverkehr gesichert werden. Zudem befinden sich die Messsysteme meistens mehrere Wochen bis Monate unbeaufsichtigt und bei jeder Wetterlage auf See. In diesem Fall erfolgt zumeist eine Positionierung mittels großer Ankersteine (bis 1.000 kg) und beleuchteten Spieren (Abbildung 3). Hierfür sind in der Regel Schiffe für das Positionieren mit Auslegerkran und Winden zwingend erforderlich und die Ausbringung unterliegt deutlich schärferen Wetterrestriktionen. Wahlweise kann auch auf Release-Einheiten (ohne Markierungen) zurückgegriffen werden.

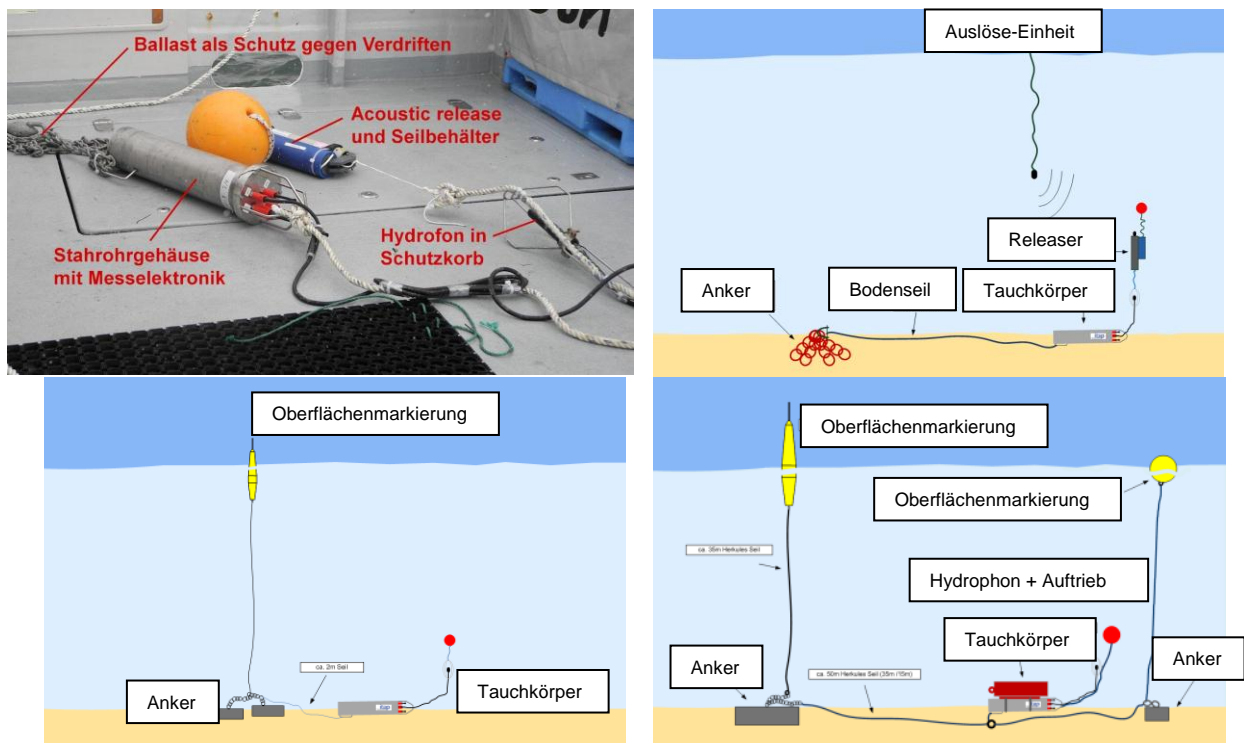


Abbildung 3: Diverse Verankerungsvarianten. Oben: mit Release – Einheit. unten: Verankerungen außerhalb des Baufeldes mit Verkehrssicherung.

4.2 Durchführung von Unterwasserschall in der Praxis

4.2.1 Basisaufnahme (Hintergrundgeräusche)

Diese Messungen erfolgen immer vor Baubeginn, so dass i. d. R. keine Verkehrssicherung im Vorhabensgebiet existiert. Der Messzeitraum beträgt mindestens 3 Wochen. Die Auslegung und die Einholung der Messsysteme erfolgt durch geschultes Personal. Die Auswertung der Messdaten erfolgt nachträglich onshore.

4.2.2 Bauphase

Während der Bauphase (Rammschall) muss zwischen Messungen innerhalb und außerhalb des Baufeldes unterschieden werden. Außerhalb des Baufeldes erfolgen das Auslegen und das Bergen der Messsysteme wie bei der Hintergrundschallmessung.

Innerhalb des Baufeldes erfolgen die Auslegung und die Bergung tagesaktuell autark durch ein baubegleitendes Schiff. Für jede durchgeführte Rammung müssen die Messsysteme mindestens einmalig eingesetzt werden. Die Auslegung der Systeme erfolgt über ein geschultes Schiffspersonal. Zu Beginn einer Bauphase ist die Auswertung unmittelbar nach Beendigung eines Fundamentstandortes durchzuführen und in Form eines Berichtes an die Genehmigungsbehörde innerhalb von 48 h zu übermitteln. Aus diesem Grund ist für die Rammungen der ersten Fundamentstandorte ein Ingenieur der itap GmbH vor Ort. Im Anschluss werden für die nachfolgenden Rammtätigkeiten die Messsysteme schnellstmöglich onshore gebracht, damit die Auswertung inkl. Berichtserstellung erfolgen kann. Zudem werden die Rammaktivitäten an mehreren Standorten als Bauzyklus definiert und gesammelt ausgewertet. Zwischen der letzten Rammung und der Berichtsabgabe liegt ebenfalls zumeist nur 48 h, so dass eine gewisse Logistik für die Anlieferung, Auswertung und Berichtserstellung mit allen Projektbeteiligten zwingend erforderlich ist.

4.2.3 Betriebsphase

Die Ausbringung und die Bergung der Messsysteme erfolgt wie bei der Hintergrundschallmessungen während einer turnusmäßigen Wartungsfahrt des OWP-Betreibers. Der Messzeitraum beträgt mindestens 4 Wochen, um die geforderten drei Leistungsbereiche der WEAs abzudecken.

4.3 Technische Herausforderungen aus der praktischen Umsetzung

Aus der mehr als 10-jährigen Messpraxis stellten sich folgende Punkte als schwierig bzw. kritisch heraus:

- Verlust oder Beschädigung von Messsystemen
- Schiffs- und wetterbedingte Restriktionen beim Auslegen und Bergen
- Ausbringung und Bergung durch „fremdes“ Schiffspersonal
- Zeitliche Restriktionen der Berichtspflicht (nur Rammschall)

Eine Beschädigung bis hin zum Verlust von Messsystemen erfolgt zumeist durch (i) unsachgemäßes Handling, (ii) „schlechtes“ Wetter oder (iii) durch Schiffskollision. Das Risiko einer Beschädigung oder eines Verlustes ist außerhalb des Baufeldes um ein Vielfaches höher als in einem abgesperrten Baufeld. Die Messsysteme befinden sich mehrere Wochen unbeaufsichtigt auf See, so dass diese ggfs. Stürmen mit Wellenhöhen von mehr als 5 m und hohen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt sind. Aus diesem Grund ist das Verankerungssystem mit einem Sicherheitsfaktor von mind. 10 ausgelegt (z. B. Seil kann die 10-fache Last der tatsächlichen Masse des Messsystems aushalten). Es zeigte sich jedoch, dass trotz des hohen Sicherheitsfaktors Beschädigungen und vor allem Verluste nicht auszuschließen sind.

Ein weiterer kritischer Punkt ist der Schiffsverkehr. Bei einer Kollision der Oberflächenmarkierung mit einem Schiff wird zumeist das Verankerungsseil zertrennt oder das gesamte Messsystem verschleppt. Zudem ist der Verlust durch Fischerei, vor allem in den letzten Jahren, durch die Verwendung von Schlepp- und Bodennetzen stark gestiegen. Ein hohes Beschädigungsrisiko besteht zudem in dem Handling der Messsysteme unter Offshore-Bedingungen. Hierbei sind zwei Faktoren zu identifizieren: zum einen muss die Auslegung und die Bergung der Messsysteme bei immer schlechteren Wetterbedingungen erfolgen, da die Wetterrestriktionen für die Gründungsarbeiten aufgrund der neuen Generation von Installationsschiffen immer weiter nach oben verschoben werden (Welle: $h_S \sim 2$ m). - Eine Rammung darf nur bei ausgelegten Hydroschallgeräten erfolgen. - Zum anderen erfolgt das Handling im Offshore-Bereich bei Bauvorhaben aus kosten- und sicherheitstechnischen Gründen zumeist durch das Schiffspersonal beteiligter Bauschiffe. Somit kann „unsachgemäßer“ Umgang mit den Messgeräten nicht ausgeschlossen werden, Abbildung 4.

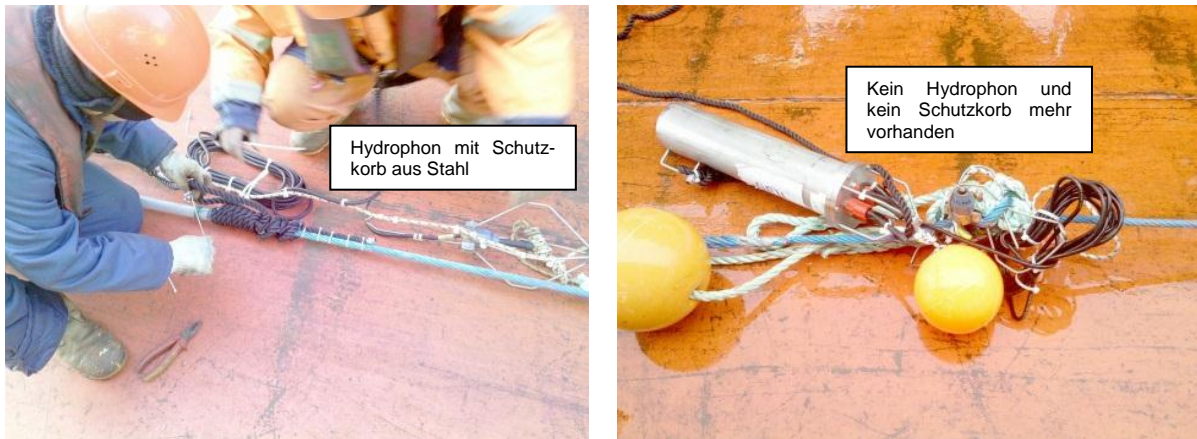


Abbildung 4: Messsystem mit Hydrophon vor (links) und nach (rechts) dem Auslegen. Das Hydrophon, sowie das Verankerungssystem sind schwer beschädigt.

5 Differenzen zwischen Anforderungen aus dem Genehmigungsverfahren und der praktischen Umsetzung

5.1 Datenformat: WAVE – MP3

Laut Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen (BSH, 2011) ist das Übergabeformat für Rohdaten PCM WAVE (24-bit). Somit ist formal auch das Aufzeichnungsformat eindeutig definiert, da eine Aufzeichnung der Messdaten in einem „geringerwertigen“ Format die Anforderungen nicht erfüllen könnte bzw. hinsichtlich des Aufnahme- und Dynamikbereichs die fehlende Bitrate durch Rauschen aufzufüllen werden würde.

Generell entscheidend für die Eignung von ggfs. komprimierten Datenformaten, wie z. B. MP3-kodierten Signalen, zu Messzwecken ist, inwieweit schalltechnische beurteilungsrelevante Messgrößen (Kapitel 3.3) durch die Komprimierung beeinflusst werden. Es zeigt sich, dass der „Fehler“ durch Verwendung eines komprimierten Datenformats bei typischen Messungen von Unterwasserschall, Rammschall beispielsweise, gering gehalten werden kann (Abbildung 5). Das liegt unter anderem daran, dass das Maskierungsphänomen bei der MP3-Encodierung relativ "zurückhaltend" ausgenutzt wird und zudem eine Gesamtenergieerhaltung hinterlegt ist. Abbildung 5 zeigt ein Schmalbandspektrum von Rammgeräuschen. Das Hydrophonsignal wurde vor Ort unkomprimiert im WAVE-Format gespeichert und für diesen Vergleich in das MP3-Format (96 kbps) konvertiert. Deutlich wird, dass der Frequenzbereich bei MP3 eingeschränkt ist, in diesem Fall auf 16 kHz. Abweichungen zwischen WAVE und

MP3 sind auch bei sehr tiefen Frequenzen unter 20 Hz zu erkennen. Beide genannten Frequenzbereiche sind jedoch nicht pegelbestimmend und somit nach StUK 4 nicht beurteilungsrelevant. Ansonsten sind die Spektren jedoch nahezu identisch. Derzeit existieren lediglich (breitbandige, einzahlige) Lärmschutzwerte hinsichtlich des Spitzenpegels (L_{Peak}) und des Einzelereignispegels (SEL) für schallintensive Bautätigkeiten (Kapitel 3.3). Aus diesem Grund sind in Abbildung 6 diese akustischen Kenngrößen für etwa 900 einzelne Rammschläge dargestellt. Dabei sind der SEL und der L_{Peak} , berechnet aus der MP3-Datei und der ursprünglichen WAVE-Datei, gegenübergestellt.

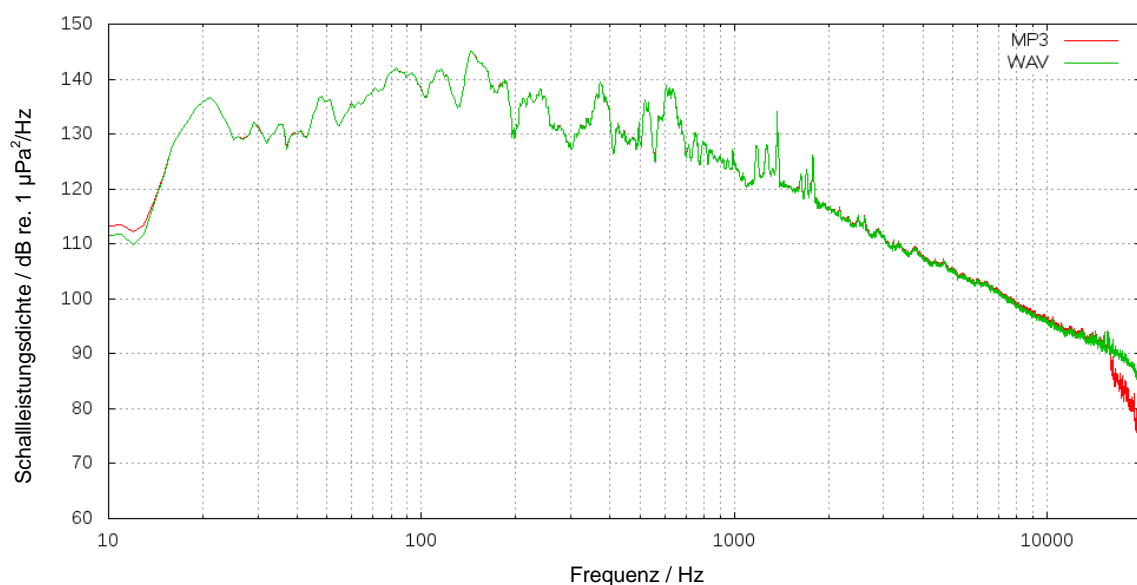


Abbildung 5: Schmalbandspektrum von Rammschall (gemittelt über 900 Schläge) in mehreren 100 m Entfernung.

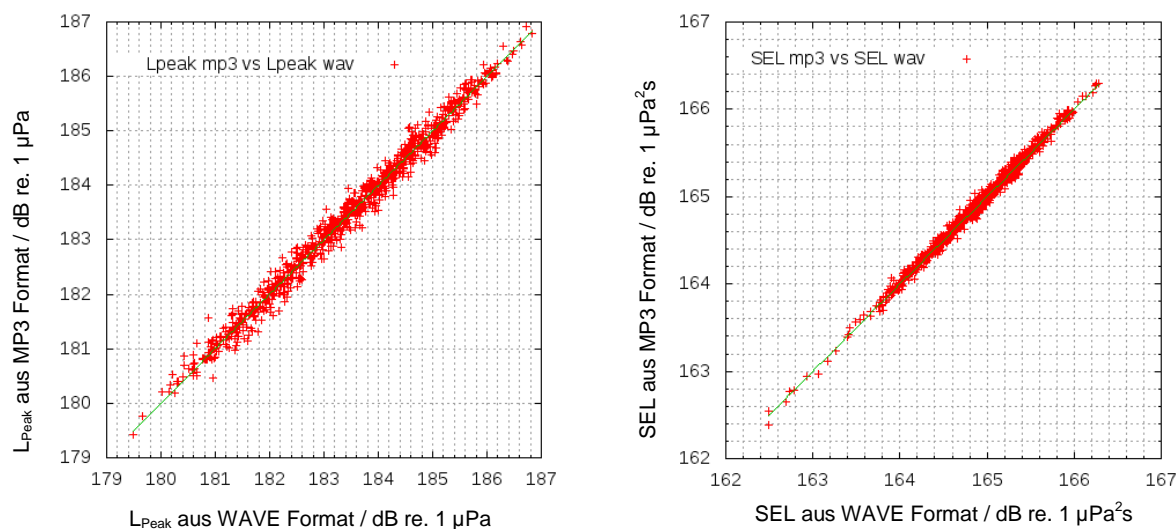


Abbildung 6: Spitzenpegel und Einzelereignispegel für 900 einzelne Rammschläge, aufgetragen als Pegel berechnet aus der MP3-Datei versus WAVE-Datei.

Die Differenzen der Werte, also die durch die MP3-Kodierung bedingten systematischen „Fehler“, liegen für beide Pegelgrößen (SEL und L_{Peak}) deutlich unterhalb von ± 1 dB. Dieser „Fehler“ ist unabhängig von der gewählten Vollaussteuerung (unveröffentlichte Stellungnahme der itap GmbH, 2012). Bei einer geforderten Messungenauigkeit von < 2 dB nach StUK4 und einer realen unsystematischen Messunsicherheit unter Offshore-Bedingungen von ± 2 dB ist dieser „Fehler“ durch Verwendung von komprimierten Datenformaten aus praktischer Sicht für die Beurteilung von Ramm-schall und Hintergrundschall durchaus hinnehmbar.

Mit dem spezifizierten WAVE (24-bit) Datenformat existieren in der Praxis z. T. gravierende Probleme hinsichtlich der generellen Genehmigungsfähigkeit und der damit verbundenen Datenmengen. Sämtliche Hydroschallmessungen außerhalb eines abgesperrten Baufeldes sind genehmigungspflichtig und das Datenformat ist mit der Genehmigungsbehörde im Einzelfall abzustimmen. Hintergrund ist, dass bei z. B. Hintergrundgeräuschmessungen auch sämtliche Schiffsbewegungen in unmittelbarer Entfernung zum Messsystem erfasst werden. Mithilfe von neuen Medien (z. B. AIS) könnten somit auch militärische Schiffsbewegungen identifiziert werden und mithilfe von hochauflösenden Auswertungsmethoden detaillierte Schiffssignaturen oder anderweitige sensible Informationen erstellt werden. Nach Auskunft der Genehmigungsbehörde sind sämtliche Messpositionen außerhalb von Baufeldern mit der Bundeswehr hinsichtlich der Lage, der Einsatzdauer und des Datenformats abzustimmen. In der Regel wird eine derartige Langzeitaufnahme nur in einem komprimierten Dateiformat, wie z. B. MP3, genehmigt, was im Widerspruch zur Messvorschrift und der StUK 4 steht.

Für die notwendigen Betriebsschallmessungen stellt hingegen ein komprimiertes Dateiformat ggfs. hinsichtlich der anschließenden Auswertung erhebliche Probleme dar. Die Hydroschallkomponenten während des Betriebes einer OWEA (Abbildung 7) sind im Vergleich zu den Hintergrundgeräuschen (zumeist dominiert durch Schiffsverkehr) sehr gering. Zum anderen werden nur einzelne schmalbandige (sinusförmige) Komponenten abgestrahlt. Durch die Verwendung eines komprimierten Datenformates könnten diese Signalanteile ggfs. nicht oder nicht exakt abgebildet werden.

In der derzeitigen Praxis werden bei Ramm-schall lediglich die Messungen in 750 m und bei Betriebsschallmessungen alle Messungen im WAVE (24-bit) Datenformat

seitens des BSHs zwingend gefordert. Bei Betriebsschallmessungen ist das Format im Einzelfall abzustimmen; oftmals wird ein WAVE Format verwendet, jedoch keine durchgehende Aufzeichnung (Intervallmessung) durchgeführt. Hintergrund- und weitere Rammschallmessungen können und können zumeist in Abstimmung mit dem BSH im komprimierten MP3 Format aufgezeichnet werden.

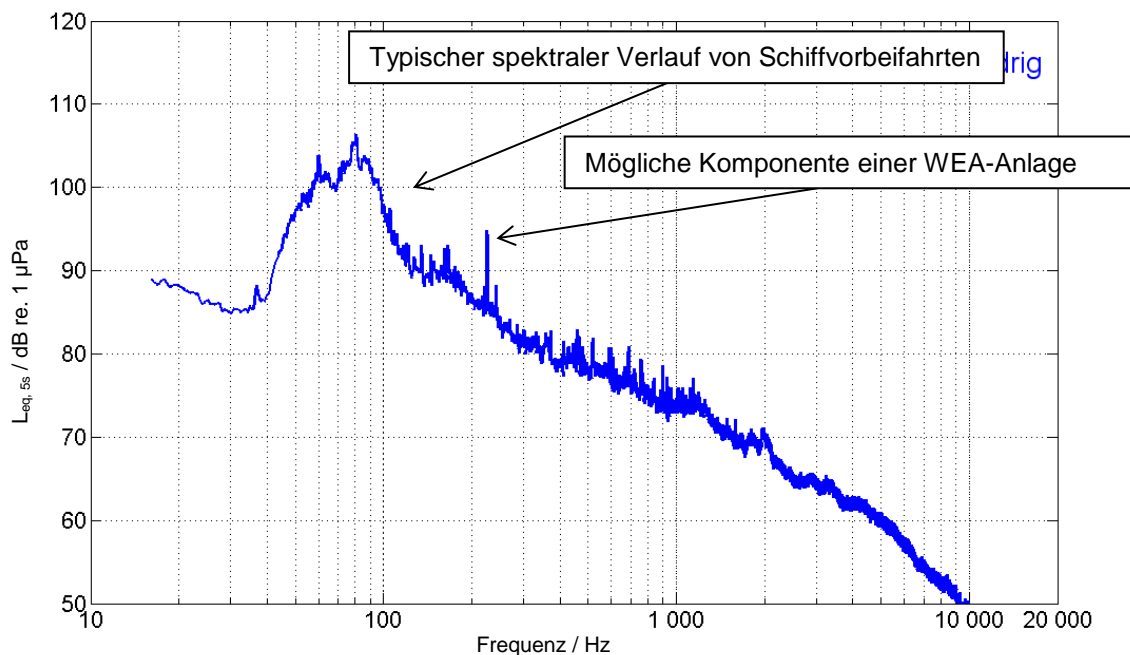


Abbildung 6: Schmalbandspektrum einer Betriebsschallmessungen eines OWPs in ca. 1 km Entfernung. Es sind keine eindeutigen Schallkomponenten der WEAs zu identifizieren. Das dargestellte Schallbandspektrum kennzeichnet die Hintergrundgeräusche außerhalb eines OWPs, das durch Schiffsverkehr dominiert wird.

5.2 Technische Grenzen

5.2.1 Laufzeit versus Speicherkapazität

Ein kritischer Punkt ist die Datenspeicherung sowie der Stromverbrauch der Hydroschallmessgeräte. Um Störgeräusche von z. B. baubegleitenden Messschiffen während der Messung zu minimieren, wird zumeist mit abgesetzten Messgeräten im offshore-Bereich gearbeitet. Somit sind sämtliche elektronischen Bauteile, wie z. B. Aufzeichnungsgerät und Speichermedien, sowie die notwendige Stromversorgung innerhalb des Messsystems zu integrieren. Maßgebend für das Systemdesign sind dabei der Stromverbrauch, die Speicherkapazität, die Aufzeichnungsdauer und das Handling der Messsysteme. Bei Verwendung eines WAVE 24-bit Datenformats werden pro Messkanal pro Stunde bei einer Samplingfrequenz von 44.1 kHz ca. 550 MB Speicherplatz notwendig (pro Tag > 13 GB). Entweder sind für eine lange

Laufzeit der Messgeräte große Speichermedien notwendig, die u. U. hohen Stromverbrauch und damit große Batterieeinheiten verlangen und somit das Handling erschweren oder eine nur sehr begrenzte Aufnahmedauer kann gewährleistet werden.

5.2.2 Dynamikbereich

In der Praxis werden je nach Messaufgabe unterschiedliche Hydrophone mit unterschiedlichen Sensitivitätsbereichen verwendet. Bei Hintergrund- und Betriebsschallmessungen werden zumeist Pegelbereiche (einzahlig) im Bereich von $70 \text{ dB} \leq L_{\text{eq},5\text{s}} \leq 120 \text{ dB}$ erreicht. Schiffsvorbeifahrten in unmittelbarer Umgebung können einen Anstieg auf bis zu 140 dB bewirken. Bei Rammschallmessungen werden ohne Verwendung von Schallminderungsmaßnahmen in Abständen von ca. 750 m Werte von bis zu 180 dB für den Einzelereignispegel (SEL) und bis zu 210 dB für den Spitzenpegel (L_{Peak}) erreicht. Unter Verwendung von schallmindernden Maßnahmen können die o. g. Werte derzeit um bis zu 20 dB reduziert werden. Mit ansteigender Entfernung zur Rammbaustelle nehmen die erreichten Pegelgrößen kontinuierlich ab. Somit sind i. d. R. Dynamikbereiche bei Hydroschallmessungen von ca. 60 dB bis max. 70 dB aus der Praxis notwendig. Bei Verwendung eines WAVE Formates mit 24-bit Auflösung beträgt der theoretische Dynamikbereich jedoch 144 dB. Im Gegensatz dazu besitzen hochwertige D/A-Wandler Dynamikbereiche von ca. 96 dB (16-bit). Hochwertige Hydrophone besitzen zumeist eine Dynamik von bis zu 80 dB, je nach verwendetem Sensorkabel und Kabellänge kann sich dieser Wert auch reduzieren. Somit ist das verwendete Hydrophon inkl. Anschlusskabel der limitierende Faktor in Punkto verwendeter Dynamikbereich und erzielter Genauigkeit. Jedes weitere verwendete Bit im Datenformat produziert somit lediglich ein „Zusatzrauschen“.

5.2.3 Messvarianz, Signal-Rauschverhältnis und Berechnungsmethode

In Abbildung 8 ist ein typischer zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels dargestellt. Jeder blaue Punkt stellt das Ergebnis eines einzelnen Rammschlages dar (Einzelerschlagauswertung). Zudem ist der zeitliche Verlauf der verwendeten Rammenergie dargestellt. Es zeigt sich, dass durch die zu Beginn geforderte Soft-Start Methode (kontinuierlicher Steigerung der Rammenergie) der Einzelereignispegel zwischen

den anfänglichen Schlägen bis hin zu Schlägen mit max. Rammenergie um mehr als 10 dB ansteigt. Bei der nach der Messvorschrift (BSH, 2011) geforderten Darstellung des 5% und 90% Perzentilwertes des Einzelereignispegels treten im Mittel Differenzen von 4 dB bis 5 dB auf. Dies zeigt, dass die beurteilungsrelevante Pegelgröße zusätzlich zur allgemeinen Messunsicherheit bzw. -varianz einer systematischen Varianz aufgrund der verwendeten Rammenergie unterliegt.

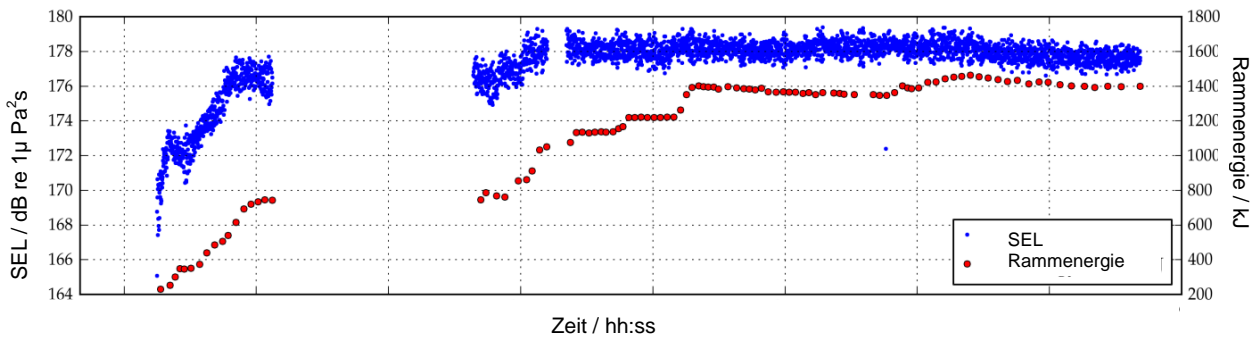


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf des Einzelereignispegels (SEL) über die gesamte Rammung. Zusätzlich ist der zeitliche Verlauf der verwendeten Rammenergie dargestellt.

Die Berechnung des Einzelereignispegels ist laut Messvorschrift (BSH, 2011) auf zwei verschiedene Arten zu berechnen:

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

T_1 und T_2 - Anfangs- bzw. Endzeit (Schallereignis liegt zwischen T_1 und T_2)
 T_0 - Bezugswert 1 Sekunde

$$SEL \approx L_{eq} - 10 \log \frac{nT_0}{T} \text{ [dB]} \quad \text{Gl. 2 (Mittelungsverfahren)}$$

n - Anzahl der Schläge pro Mittelungszeitraum T

Die Gleichung 2 (Mittelungsverfahren) ist jedoch nur anwendbar, wenn der Rammerschall mindestens 10 dB lauter ist als der Hintergrundschall. Wenn die Amplitude eines (nahezu gleichförmigen) Störschalls im Bereich des zu messenden Rammschalls liegt (Signal-Rausch-Verhältnis ~ 6 dB), ergeben sich aus der Gleichung 2 erhebliche „Berechnungsfehler“ von bis zu 1 dB bei der Bestimmung des Einzelereignispegels. Eine Berechnung vom Einzelereignispegel mit Gleichung 1 wird jedoch ebenfalls aufgrund des mangelnden Signal-Rauschverhältnisses „fehlerhaft“ sein. Im Falle von impulshaltigen Störungen, die nur zeitweise auftreten, benötigt man bei der Einzelschlaganalyse (Gleichung 1) pro Rammschlag jeweils nur einen sehr kurzen Zeitbe-

reich von der Dauer eines Rammschlages (ca. 0,1 Sekunden) mit einem hohen Signal-Rauschverhältnis, um den Einzelereignispegel „fehlerfrei“ zu berechnen. Somit spielt bei der Einzelschlaganalyse der impulshafte Hintergrund- bzw. Störschall zwischen zwei Rammschlägen keine Rolle. Sollte eine impulshaltige Störung während des zu messenden Rammschallereignisses auftreten (z. B. technische Störung oder Rammschlag aus einem anderen Baufeld) so ist eine Berechnung des Einzelereignispegels mit keiner der beiden genannten Methode „fehlerfrei“ möglich.

Es zeigte sich bei Messungen in und um diversen Offshore-Windparks, dass z. T. sehr starke impulshaltige Störgeräusche auftreten können, die eine Auswertung nach der vereinfachten Berechnungsmethode (Gleichung 2) nicht ermöglichen. Durch die Einzelschlaganalyse (Gleichung 1) konnten jedoch wenigstens einige Schläge ohne den Einfluss eines Störgeräusches ausgewertet werden.

Es ist jedoch häufig so, dass der zeitliche Verlauf des Einzelereignispegels über einen kompletten Rammvorgang eines ganzen Pfahles deutliche Varianzen aufweist (Abbildung 8). Sollten für eine Auswertung nicht sämtliche Rammschläge zur Verfügung stehen, ist für die Evaluation des gesamten Rammvorganges wesentlich, wie viele Rammschläge (z. B. in Prozent) und in welchem Rammabschnitt (zu Beginn oder am Ende einer Rammung) für die Berechnung und Darstellung des Einzelereignispegels zur Verfügung standen. Im Idealfall werden alle Rammschläge berücksichtigt, so dass sich keine Unterschiede zwischen beiden Methoden ergeben. Im anderen Extremfall sind nur einige wenige Rammschläge zu Beginn einer Pfahlrammung verfügbar, so dass die dargestellten Ergebnisse des Einzelereignispegels (5%, 50% und 90% Perzentilpegel) qualitativ eine Unsicherheit im Bereich der Messvarianz aufweisen können.

Somit können die Ergebnisse einer Einzelschlaganalyse (Gleichung 1) mit nur wenigen Prozent der Rammschläge sicherlich nicht als Evaluation eines eingesetzten Schallminderungssystems oder als Kriterium der Einhaltung eines Lärmwertes verwendet werden, bieten jedoch die Möglichkeit einer qualitativen Einschätzung einer mit Störung behafteten Rammschallmessung. Diese Möglichkeit ist jedoch in der derzeitigen Messvorschrift (BSH, 2011) nicht vorgesehen.

Ein derzeitiges Problem stellen zudem zunehmend die kontinuierlich besser werdenden Schallschutzsysteme bei Messungen im nächsten Naturschutzgebiet in Entfer-

nungen von 20 km und mehr dar, da durch die erhöhte Schallminderung der Systeme die zu messenden Rammschallgeräusche zunehmend leiser werden. In Abbildung 9 sind die Zeitsignale während einer Impulsrammung in ca. 750 m (links) und in ca. 20 km (rechts) Entfernung dargestellt. Mit zunehmender Entfernung nimmt der Schalldruckpegel erheblich ab. In ca. 20 km sind somit bei Einhaltung des $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ Wertes in 750 m Entfernung die Rammschallimpulse oftmals im Pegelbereich der Hintergrundgeräusche. Somit nimmt das Signal-Rauschverhältnis mit der Entfernung erheblich ab und die Berechnung eines Einzelereignispegels wird fehleranfällig oder im Extremfall nicht mehr möglich. Bei einer (zeitgleichen) parallel stattfindenden Rammung in zwei OWPs versagt die Berechnung des Einzelereignispegels zumeist komplett bei Messungen in großen Entfernungen, da die beiden Schallereignisse meistens vergleichbare Amplituden haben und sich zeitweise überlagern.

Das Lärmschutzkriterium von $160 \text{ dB}_{\text{SEL}}$ in 750 m wurde zur Vermeidung von Schäden bei marinen Säugetieren durch schallintensive Baumaßnahmen entwickelt. Bei Messungen in 20 km Entfernung und Werten im Bereich der Hintergrundgeräusche (insbesondere bei starkem öffentlichen Schiffsverkehr) kann von einer schädigenden Wirkung durch Schall nicht mehr die Rede sein, sondern eine Störung oder eine Hörbarkeit ist gegeben. Derzeit existieren aus wissenschaftlicher Sicht erhebliche Zweifel an der Pegelgröße Einzelereignispegel als geeignete Beurteilungsgrundlage für die Störung von marinen Säugetieren durch Schall. Es ist derzeit Gegenstand der Forschung andere Pegelgrößen, wie z. B. der Dauerschallpegel (L_{eq}), hinsichtlich ihrer Eignung als Pegelgröße für Störung, zu entwickeln (Nehls & Bellmann, 2013).

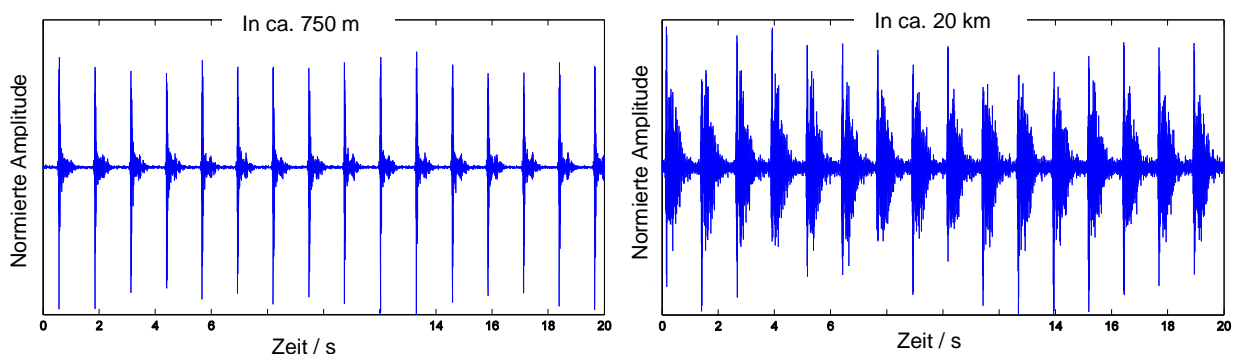


Abbildung 9: Darstellung des gemessenen Zeitsignale des Schalldruckpegels (normierte Amplitude) während einer Impulsrammung in ca. 750 m (links) und in ca. 20 km (rechts) Entfernung.

5.3 Fazit

Die derzeitigen parallel im Bau befindlichen OWPs und die damit überlagernden Hydroschallradien stellen eine echte Herausforderung an die Messtechnik und anschließende Auswertungssoftware und sind derzeit noch nicht hinreichend in Messvorschriften berücksichtigt. Hierbei geht es darum, einen geeigneten Mittelweg zwischen den Problemen mit Laufzeiten, Verankerungen, Handling und Datenspeicherungen auf der einen Seite und tatsächlichen verfügbaren Signal-Rauschverhältnissen, vorhandenem Datenmaterial und daraus resultierenden Beurteilungsgrößen zu finden.

6 Zusammenfassung

Es wurden die Anforderungen und Maßgaben an die Hydroschallmessungen, insbesondere an die verwendete Messsensorik, beim Bau von Offshore-Windparks aus Sicht des Genehmigungsverfahrens den Erfahrungen aus der Praxis gegenüber gestellt. Zudem wurde ein von der itap GmbH entwickeltes Hydroschallmessgerät vorgestellt, welches diese Anforderungen vollständig erfüllt und sich im Praxiseinsatz unter schwierigen Offshore-Bedingungen bewährt hat.

Es wurde aufgezeigt, dass zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen den Maßgaben und der gängigen Praxis hinsichtlich Messgenauigkeit, Messdatenformat und notwendigem Dynamikbereich existieren. Die erhöhten Anforderungen an die Messsensorik seitens der Genehmigungsbehörden sind für die Berechnung der beurteilungsrelevanten akustischen Kenngrößen hinsichtlich der vorhandenen Beurteilungsvorgaben nicht zwingend notwendig. Andererseits werden die verschleißintensiven und zeitlich restriktiven Anforderungen aus der Praxis nicht adäquat berücksichtigt.

Die Erfahrungen aus der praktischen Anwendung der Messsensorik offshore zeigen, dass die StUK 4 zwar Mindestanforderungen vorgibt, jedoch Anpassungen und Erweiterungen basierend aus der Praxis und Wissenschaft notwendig sind.

7 Acknowledgement

Ein großer Dank geht an die Kollegen Dr. Klaus Betke, Rainer Matuschek, Hauke Holst, Siegfried Gündert, Michael Müller und Bajo Meenen für die Unterstützung bei allen technischen Ausführungen, sowie Analysen, Bildern etc.

Ein weiterer Dank geht an alle beteiligten (Bau-) Firmen im Offshore-Bereich für die tatkräftige Unterstützung bei allen bisher ausgeführten Offshore-Einsätzen.

Zu guter Letzt auch ein Dank an alle Behörden im Genehmigungsverfahren und Mitwirkenden der StUK 4 für kontroverse Diskussionen und den Mut zur Erstellung von Mindestanforderungen, sowie den unkomplizierten Umgang mit eventuellen aus der praktischen Erfahrung notwendigen Abweichungen bei der Durchführung der Hydro-schallmessungen.

8 Literatur

- [1] **Bellmann MA & Gerke P (2013)** Methoden zur Berechnung des Einzelereignispiegels. Gutachterliche Stellungnahme für das BSH
- [2] **BSH (2011)** Messvorschrift für Unterwasserschallmessungen – Aktuelle Vorgehensweise mit Anmerkungen. Bericht im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ökologische Begleitforschung am Offshore-Testfeldvorhaben alpha ventus zur Evaluierung des Standarduntersuchungskonzeptes des **BSH (StUKplus)**“, **Förderkennzeichen 0327689A**
- [3] **BSH (2013)** Offshore-Windparks – Messvorschrift für die quantitative Bestimmung der Wirksamkeit von Schalldämmmaßnahmen. Bericht Nr. M100004/05 erstellt im Rahmen des Forschungsvorhabens „Studie zu Bewertungsansätzen für Unterwasserschallmonitoring im Zusammenhang mit Offshore-Genehmigungsverfahren, Raumordnung und Meeresstrategierahmenrichtlinie“ im Auftrag des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
- [4] **BSH (2013)**: Standard Untersuchung der Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die Meeresumwelt (StUK 4)
- [5] **ISO IEC 11172-3 (1993)** Information technology – Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s – Part 3: Audio
- [6] **Nehls & Bellmann (2013)** Auswirkungen von Schallemissionen durch Offshore-Rammarbeiten auf Schweinswale. Schalltechnischer Bericht im Auftrag von Vattenfall