

Umweltforschungsplan  
des Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Förderkennzeichen (UFOPLAN) 205 53 113

Lärminderung an Anlagen und Produkten

**Minderung des Unterwasserschalls bei  
Rammarbeiten für Offshore-WEA –  
Praktische Erprobung verschiedener Verfahren  
unter Offshore-Bedingungen**

von

Dr. Manfred Schultz – von Glahn (ITAP)  
Dr. Klaus Betke (ITAP)  
Dr. Georg Nehls (BioConsult SH)

ITAP – Institut für technische  
und angewandte Physik GmbH  
an der Universität Oldenburg  
Marie-Curie-Straße 8  
26129 Oldenburg

Bio Consult SH  
Brinckmannstraße 31  
25813 Husum

F+Z Baugesellschaft mbH  
Kanalstraße 44  
22085 Hamburg

Menck GmbH  
Am Springmoor  
24568 Kaltenkirchen

IM AUFTRAG DES UMWELTBUNDESAMTES

Oktober 2006

## Berichts-Kennblatt

1. <i>Berichtsnummer</i> UBA-FB	2.	3.
4. <i>Titel des Berichts</i> Minderung des Unterwasserschalls bei Rammarbeiten für Offshore-WEA – Praktische Erprobung verschiedener Verfahren unter Offshore-Bedingungen		
5. <i>Autor(en), Name(n), Vorname(n)</i> Betke, Klaus (ITAP) Schultz – von Glahn, Manfred (ITAP) Nehls, Georg (BioConsult SH)		8. <i>Abschlußdatum</i> 31. Oktober 2006
6. <i>Durchführende Institution (Name, Anschrift)</i>  ITAP – Institut für technische und angewandte Physik GmbH, Marie-Curie-Straße 8, 26129 Oldenburg BioConsult SH, Brinckmannstraße 31, 25813 Husum F+Z Baugesellschaft mbH, Kanalstraße 44, 22085 Hamburg Menck GmbH, Am Springmoor, 24568 Kaltenkirchen		9. <i>Veröffentlichungsdatum</i>
		10. <i>UFOPLAN-Nr.</i>  205 53 113
		11. <i>Seitenzahl</i> 59
		12. <i>Literaturangaben</i> 25
7. <i>Fördernde Institution (Name, Anschrift)</i>  Umweltbundesamt, Postfach 14 06, D-06813 Dessau		13. <i>Tabellen und Diagramme</i> 42
		14. <i>Abbildungen</i> 14
		15. <i>Zusätzliche Angaben</i>
16. <i>Kurzfassung</i>  Beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen werden Stahlrohre von mehreren Metern Durchmesser bis zu 30 m in den Meeresboden getrieben. Überwiegend wird dazu die bewährte Schlagramm-technik eingesetzt. Dabei treten unter Wasser sehr starke impulsartige Geräusche auf. In 1 km Abstand kann der Spitzenschalldruck noch mehrere kPa betragen. Nach dem jetzigen Kenntnisstand sind diese Geräusche für Meerestiere potenziell gefährlich und Lärminderungsmaßnahmen sind deshalb notwendig. In dieser Arbeit wurde die Wirksamkeit von Abschirmungen im realitätsnahen Maßstab experimentell untersucht. Mit einem schaumbeschichteten Schallschutzrohr, welches über den Rammpfahl gestülpt wurde, konnten die Rammgeräusche je nach Frequenz um 5 dB bis 25 dB reduziert werden. Bei 1 kHz wurden etwa 10 dB Minderung erzielt, bei 10 kHz etwa 20 dB.		
17. <i>Schlagwörter</i> Offshore, Windenergie, Rammen, Unterwasserschall, Schallschutz, Schweinswal		
18. <i>Preis</i>	19.	20.

## Report Cover Sheet

1. <i>Report No.</i> UBA-FB	2.	3.
4. <i>Report Title</i>		
5. <i>Autor(s), Family Name(s), First Name(s)</i> Betke, Klaus (ITAP) Schultz – von Glahn, Manfred (ITAP) Nehls, Georg (BioConsult SH)		8. <i>Report Date</i> 31 October 2006
6. <i>Performing Organisation (Name, Address)</i>  ITAP – Institut für technische und angewandte Physik GmbH, Marie-Curie-Straße 8, 26129 Oldenburg BioConsult SH, Brinckmannstraße 31, 25813 Husum F+Z Baugesellschaft mbH, Kanalstraße 44, 22085 Hamburg Menck GmbH, Am Springmoor, 24568 Kaltenkirchen		9. <i>Publication Date</i>
7. <i>Sponsoring Agency (Name, Address)</i>  Umweltbundesamt, Postfach 14 06, D-06813 Dessau		10. <i>UFOPLAN-Ref. No.</i>  205 53 113
		11. <i>No. of Pages</i> 59
		12. <i>No. of References</i> 25
		13. <i>No. of Tables, Diagrams</i> 42
		14. <i>No. of Figures</i> 14
15. <i>Supplementary Notes</i>		
16. <i>Abstract</i> Along with offshore wind turbine construction, steel tubes of several metres diameter are driven up to 30 metres into the sea floor. In most cases, the well-established impulse pile driving technique is used. This produces very strong, impulsive underwater noise. At a distance of 1 km, the peak sound pressure can be several kPa. This sound is potentially harmful for marine animals, hence noise reduction is necessary. In this work, sound screenings were evaluated experimentally. In order to gather experience in handling under offshore conditions, the tests were made at full or near full scale. With a foam-coated tube that was put over the pile, a noise reduction of 5 to 25 dB was achieved. The level was lowered by about 10 dB at 1 kHz and 20 dB at 10 kHz.		
17. <i>Keywords</i> offshore wind energy, pile driving, underwater noise, noise control, harbour porpoise		
18. <i>Price</i>	19.	20.

## Inhalt

<b>1. Einleitung</b> .....	Seite 5
<b>2. Technischer und biologischer Hintergrund</b> .....	6
2.1 Schalltechnische Messgrößen in der Hydroakustik .....	6
2.1.1 Äquivalenter Dauerschallpegel .....	6
2.1.2 Einzelereignis-Schalldruckpegel .....	7
2.1.3 Spitzenpegel .....	8
2.2 Schallwirkung auf marine Lebewesen .....	9
2.3 Bei Offshore-Rammarbeiten gemessene Schallpegel .....	11
2.4 Verfahren zur Schallminderung beim Rammen .....	13
2.4.1 Verlängerung der Schlagdauer .....	14
2.4.2 Einsatz von Freifallrammen .....	14
2.4.3 Einsatz von Vibrationsrammen .....	15
2.4.4 Schallschirme und Schallkapseln .....	15
2.4.4 Blasenschleier .....	16
<b>3. Physikalische Beschreibung des untersuchten Verfahrens</b> .....	17
<b>4. Durchführung der Erprobung</b> .....	21
4.1 Versuchsaufbau .....	21
4.2 Ablauf der Messung .....	24
4.3 Schallschutzrohr mit Schaumbeschichtung .....	25
4.4 Rohr ohne Beschichtung .....	26
4.5 Schallschutzvorhang .....	28
<b>5. Ergebnisse</b> .....	30
5.1 Auswertung der akustischen Daten .....	30
5.2 Einfluss der Schlagenergie auf die Schallabstrahlung .....	37
5.3 Schallschutzrohr mit Schaumbeschichtung .....	38
5.4 Rohr ohne Beschichtung .....	38
5.5 Schallschutzvorhang .....	40
5.6 Beurteilung der Ergebnisse aus biologischer Sicht .....	41
5.7 Erfahrungen mit der Handhabung der Schallschutzsysteme auf See .....	43
<b>6. Literatur</b> .....	45
<b>7. Zusammenfassung</b> .....	47
<b>Anhang: Diagramm Daten in Tabellen</b> .....	48

## 1. Einleitung

In den kommenden Jahren wird die Nutzung der Offshore-Windenergie stark zunehmen. In der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Bundesrepublik Deutschland sind bereits etwa 780 Offshore-Windenergieanlagen genehmigt; davon 700 in der der Nordsee (Stand: März 2006. Quelle: BSH). Bei den Gründungsarbeiten zur Errichtung der Anlagen werden überwiegend Schlagrammen zum Einsatz kommen. Diese erzeugen äußerst intensiven Schall unter Wasser, der die Hörorgane von Meeressäugern und Fischen schädigen kann. Außerdem kann das Verhalten der Tiere über einen Radius von vielen Kilometern beeinträchtigt werden. Wegen der kommenden starken Bautätigkeit und deren behördlicher Beschränkung auf bestimmte Monate ist außerdem zu erwarten, dass zeitweise an mehreren Stellen der Nordsee gleichzeitig Rammarbeiten stattfinden. Flucht- oder Rückzugsmöglichkeiten werden dadurch zusätzlich eingeschränkt. Es besteht daher die Notwendigkeit, die Unterwasser-Schallabstrahlung bei Rammarbeiten zu verringern.

In diesem Projekt wurde ein neuartiges Verfahren zur Minderung des Unterwasserschalls erprobt. Dabei wird das Rammgut mit einer lufthaltigen Schicht umgeben. Durch die Schicht wird die Impedanzanpassung zwischen Stahl und Wasser gestört und die Schallabstrahlung dadurch deutlich vermindert.

Die ursprüngliche Überlegung, die Schicht direkt auf das Rammgut aufzubringen, wurde im Laufe des Projektes verworfen zugunsten eines im Prinzip wiederverwendbaren "Schallschutzrohres". Das mit einer lufthaltigen Beschichtung versehene Rohr wird über das Rammgut gestülpt.

Das Vorhaben ist als Ergänzung zu dem vom BMU geförderten Forschungsvorhaben *Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch Schallimmissionen von Offshore-Windenergieanlagen* (Förderkennzeichen 0329947) zu sehen, in dem theoretische Vorarbeiten sowie Modellversuche durchgeführt werden. Das hier beschriebene Projekt konzentriert sich dagegen auf die Erprobung unter tatsächlichen Größenverhältnissen sowie die Erarbeitung einer im realen Einsatz handhabbaren Methode.

## 2. Technischer und biologischer Hintergrund

### 2.1 Schalltechnische Messgrößen in der Hydroakustik

In der Akustik werden meist keine Schalldruckamplituden angegeben, sondern *Pegel*. Der Schalldruckpegel  $L$  in dB ist allgemein gegeben durch

$$L = 20 \log (p_{\text{RMS}} / p_0) . \quad (2.1)$$

Hierin ist  $p_{\text{RMS}}$  der quadratische Mittelwert des Schalldrucks über einen bestimmten Zeitraum (der quadratische Mittelwert einer Folge von Zahlen  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ist gegeben durch  $\sqrt{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2) / n}$ , daher RMS = root mean square).

Der Bezugsdruck  $p_0$  hat bei Wasserschall vereinbarungsgemäß den Wert  $1 \mu\text{Pa}$ . Die übliche Schreibweise ist *dB re 1  $\mu\text{Pa}$* . Beispiel: Ein RMS-Wert des Schalldrucks im Wasser von  $10 \text{ Pa}$  bedeutet einen Schalldruckpegel von  $140 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}$ .

Im Zusammenhang mit Bau- und Betriebsgeräuschen von Offshore-Windenergieanlagen sind vor allem folgende Pegelgrößen von Bedeutung:

- Äquivalenter Dauerschallpegel  $L_{\text{eq}}$
- Einzelereignis-Schalldruckpegel  $L_E$
- Spitzenpegel  $L_{\text{peak}}$

Je nach Fragestellung kann es sinnvoll sein, diese Pegel entweder breitbandig anzugeben oder aber frequenzselektiv, z.B. in Oktav- oder Terzbändern.

#### 2.1.1 Äquivalenter Dauerschallpegel

Da der Schalldruck stark schwanken kann, wird häufig der Mittelungspegel oder äquivalente Dauerschallpegel  $L_{\text{eq}}$  angegeben:

$$L_{\text{eq}} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2.2)$$

Hierin ist  $T$  die Mittelungsdauer. Gleichung (2.2) ist nichts anderes als eine präzisere Formulierung von Gl. (2.1). Die Quadratwurzel zur Berechnung des RMS-Wertes des Schalldrucks taucht in der Formel nicht explizit auf, denn das Radizieren und die anschließende Umrechnung in dB sind durch das Logarithmieren zu einem Schritt zusammengefasst. Dies drückt sich im Faktor 10 aus statt 20 wie in Gl. (2.1).

### 2.1.2 Einzelereignis-Schalldruckpegel

Bei zeitlich nichtstationärem Schall (Impulsen) ist der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  allein kein geeignetes Maß. So wird der  $L_{eq}$  von Rammgeräuschen nicht nur durch die Stärke der Impulse bestimmt, sondern auch durch deren zeitlichen Abstand, was Vergleiche erschwert.

Diese Schwierigkeit kann durch Angabe des Einzelereignis-Schalldruckpegels  $L_E$  umgangen werden. Dieser ist der auf eine Dauer von 1 s bezogene äquivalente Dauerschallpegel eines isolierten Schallereignisses:

$$L_E = 10 \log \left( \frac{1}{T_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2.3)$$

Hierin ist  $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ . und  $T_0 = 1 \text{ s}$ . Die Integrationsgrenzen  $T_1$  und  $T_2$  sind so zu wählen, dass sie alle signifikanten Teile des Ereignisses einschließen (Bild 2.1).

Gelegentlich findet man in der Literatur als Maß für die Energie eines Schallimpulses – genauer gesagt, für dessen *Energiefluss* – die Angabe eines Pegels in dB re  $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ . *Dieser Wert ist zahlenmäßig gleich dem Einzelereignis-Schalldruckpegel  $L_E$ .*



Bild 2.1. Zur Bestimmung des Einzelereignis-Schalldruckpegels

Zwischen  $L_{eq}$  und  $L_E$  besteht der Zusammenhang

$$L_{eq} = 10 \log \frac{T_0}{T} \sum_{i=1}^n 10^{L_{Ei}/10} \quad (2.4)$$

Hierin ist  $n$  die Anzahl der Schallimpulse in der Zeit  $T$  und  $L_{Ei}$  ist der Einzelereignis-Schalldruckpegel des  $i$ -ten Impulses. Interessiert man sich nur für einen mittleren Wert des Einzelereignis-Schalldruckpegels von  $n$  Schallimpulsen, ist die Umrechnung besonders einfach:

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

Diese Beziehung ist hilfreich, da der  $L_{eq}$  meist einfacher zu messen ist als der  $L_E$ : Angenommen, man hat einen Pegelmessgerät auf eine Mittelungszeit  $T = 60$  s eingestellt. Während dieser Zeit werden beispielsweise 20 Rammschläge gezählt. Am Ende der Messzeit werde ein  $L_{eq}$  von 160 dB angezeigt. Der mittlere Einzelereignis-Schalldruckpegel eines Rammschlags ist in diesem Beispiel

$$L_E = 160 - 10 \log(20/60) = 164.8 \text{ dB.}$$

Das Verfahren der Berechnung des  $L_E$  aus dem  $L_{eq}$  ist umso genauer, je weniger Fremdschall zwischen den Impulsen im Signal enthalten ist.

### 2.1.3 Spitzenpegel

Der Spitzenpegel  $L_{peak}$  stellt insofern eine Ausnahme bei den Pegelgrößen dar, als es *kein gemittelter Wert* ist, sondern einfach der logarithmierte Spitzenwert  $p_{peak}$  des Schalldrucks:

$$L_{peak} = 20 \log (|p_{peak}| / p_0) \quad (2.6)$$

Dabei kann  $p_{peak}$  auch negativ sein. Dies wird durch die Betragsstriche in Gleichung (2.6) berücksichtigt. Der Bezugswert  $p_0$  ist wie üblich  $1 \mu\text{Pa}$ .

Beispiel: Bei dem Signal in Bild 2.2 ist  $L_{peak} = 20 \log (3400/10^{-6}) \text{ dB} = 190.6 \text{ dB}$ .

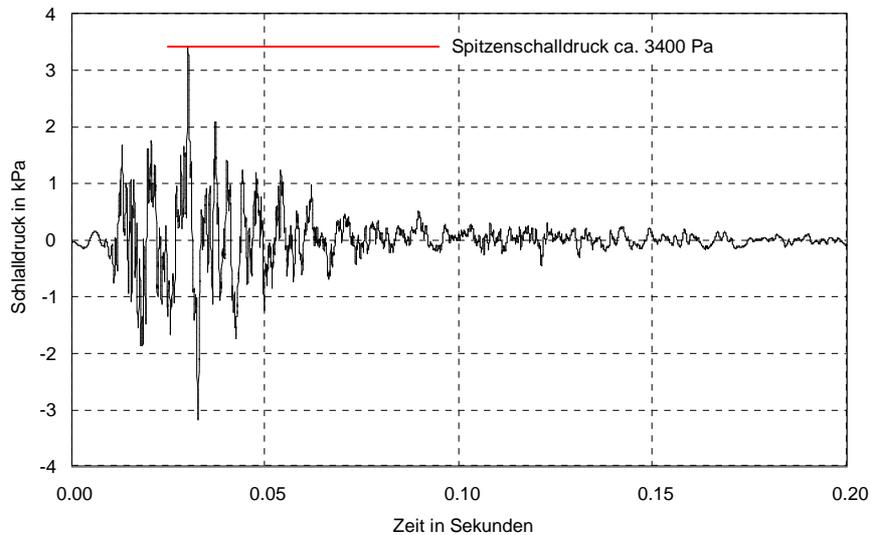


Bild 2.2. Zur Definition des Spitzenpegels

## 2.2 Schallwirkung auf marine Lebewesen

Lärmemissionen von Offshore-Rammarbeiten können von Meeressäugern über große Strecken wahrgenommen werden. Der Hörbereich eines Schweinswals reicht wenigstens von unter 1 kHz bis etwa 150 kHz, mit der größten Hörempfindlichkeit zwischen 10 und 100 kHz [Kastelein 2002]. In diesem Bereich liegt die Hörschwelle niedrig bei etwa 40 - 50 dB. Die Hörschwelle steigt bei tieferen Frequenzen stark an. Das Hörvermögen von Robben ist grundsätzlich etwas schlechter als das von Schweinswalen; die Hörschwelle liegt im empfindlichsten Bereich bei den meisten Arten zwischen 60 und 80 dB. Die Hörschwelle der Robben liegt in tieferen Frequenzen jedoch niedriger als bei Schweinswalen. Da die meisten anthropogenen Geräuschquellen ihre höchste Intensität in niedrigen Frequenzbereichen haben, können Robben diese Geräuschbelastungen in größeren Bereichen wahrnehmen als Schweinswale.

Intensiver Schall kann bei vielen Tierarten zu physiologischen Schäden führen. Als erste Stufe wird dabei eine vorübergehende Anhebung der Hörschwelle angesehen (Temporary Threshold Shift, TTS). Neben Stressreaktionen kann diese Abnahme der Hörempfindlichkeit eine Beeinträchtigung der akustischen Kommunikation und des Orientierungssinns bewirken. Wenn sich eine TTS nicht innerhalb eines bestimmten Zeitraums erholt, spricht man von einer permanenten Schwellenanhebung (PTS). Diese zeigt eine dauerhafte Schädigung des Gehörs an. Bei Meereslebewesen sind diese Phänomene am besten an Säugetieren untersucht, wengleich auch hier die Datenlage noch sehr lückenhaft ist. Danach wurde TTS bei verschiedenen Walarten bei Schalldruckpegeln (Spitzenpegel) ab etwa 180 dB re 1  $\mu$ Pa beobachtet [Lucke 2003]. Sehr kurze Schallimpulse bewirken erst bei höheren Pegeln als bei

Dauerschall TTS, andererseits sinkt die Pegelschwelle für das Auftreten von TTS bei wiederholter Einwirkung eines lauten Schallsignals.

Neuere Untersuchungen erlauben eine genauere Einschätzung der Schwelle, ab der TTS zu erwarten ist. Auf der Basis verschiedener neuer Untersuchungen zu TTS bei Meeressäugern legten Ketten und Finneran der nordamerikanischen Marine Mammal Commission folgende Einschätzung vor, ab welchen Schallpegeln TTS zu erwarten ist [Ketten und Finneran 2004, S. 55-57]:

	Einzelereignis-Schalldruckpegel von Impulsen	Spitzenpegel
Cetaceen (Messungen an Tümmlern und Belugas)	183 dB	224 dB
Robben	163 dB	203 dB

Obige Angaben sind unabhängig von der Frequenz der Schallemissionen und des Hörvermögens von Meeressäugern. Die Frequenz kann aber sowohl für die Frage der Schädigung wie auch einer möglichen Störwirkung von Rammarbeiten von Bedeutung sein. Richardson et al. [1995] übertragen die Plus-80-dB-Regel in Abänderung vom Menschen auch auf marine Säuger. Diese besagt, dass TTS auftreten kann, wenn die Schalleinwirkung auf einen Menschen dessen Hörschwelle um 80 dB übersteigt. Dies ist die leichteste Form einer Gehörschädigung, die reversibel ist und etwa durch einen Diskothekenbesuch oder den Mitflug in Kleinflugzeugen ausgelöst werden kann. Die grundsätzliche Anwendbarkeit dieser Regel bei Meeressäugern wurde in vergleichbarer Größenordnung durch nachfolgende Untersuchungen untermauert, wobei Impulse erst bei höheren Intensitäten TTS erzeugen als Dauertöne [Au et al. 1999, Kastak et al. 1999, s.a. Thomsen et al. 2006]. Richardson et al. [1995] erwarten, dass marine Säuger Bereiche meiden, in denen Schallpegel von mehr als 140 dB im besten Hörbereich der Tiere vorherrschen und eine Schädigung ab 200 dB auftreten kann. Talisman [2006] und Thomsen et al. [2006] rechnen mit einer Schädigung bei Rammarbeiten mit einer Schallemission von 225 dB (Quellpegel in 1 m Abstand) bis zu einer Entfernung von etwa 1 km.

Auswirkungen in Form von Verhaltensänderungen, insbesondere einer Meidungsreaktion, können bei deutlich niedrigeren Werten erreicht werden, jedoch ist die Reaktion von Meeressäugern auf Schalleinträge sehr unterschiedlich. Während der Rammarbeiten für den dänischen Offshore-Windpark Horns Rev wurden kurzzeitig großräumige Verhaltensänderungen bis in 15 km Entfernung ermittelt. Die Reaktion von Schweinswalen scheint jedoch nicht allein von der Stärke der Schallemissionen abzuhängen und im dänischen Offshore-Windpark Nysted in der Ostsee wurde trotz deutlich geringeren Schallemissionen stärkere und länger anhaltende Reaktionen von Schweinswalen festgestellt [Carstensen et al. 2006]. Für die Bauarbeiten am Beatrice Demonstrationswindpark in Schottland, bei dem zwei Offshore-WEA

in 45 m Wassertiefe aufgestellt wurden, wurde ein Störradius für Schweinswale von 9.3 km und für Seehunde von 7.5 km berechnet [Talisman 2006]. Als Schallemission wurde hierfür ein Quellpegel in 1 m von 225 dB angenommen (allerdings ist nicht klar, welche Art von Mittelungs- oder Spitzenpegel gemeint ist. Von Talisman werden offenbar verschiedene, nicht näher spezifizierte Pegelgrößen nebeneinander ohne Unterscheidung diskutiert).

Wie schwierig es ist, von physiologischen Daten auf die tatsächlichen Reaktionen von Meeressäugern zu schließen verdeutlicht der Vergleich von Schweinswalen und Seehunden. Seehunde werden aufgrund ihrer besseren Hörfähigkeit teilweise als empfindlicher als Schweinswale eingestuft und auch Talisman [2006, S. 191] berechnet einen ähnlichen Störradius wie für Schweinswale. Bei den Bauarbeiten für den dänischen Offshore-Windpark Horns Rev wurden jedoch keine Reaktionen von Seehunden festgestellt, die auch während der Rammarbeiten den Bereich des Windparks durchquerten [Tougaard et al. 2003], während Schweinswale auch in größerer Entfernung reagierten. Auch Thomsen et al. [2006] kommen nach eingehender Auswertung der Literatur zu der Aussage, dass sich Störradien für Meeressäuger derzeit kaum abgrenzen lassen und bei den Bauarbeiten für Offshore-Windparks derzeit von mehreren Kilometern, möglicherweise 15 – 20 km, auszugehen ist.

Viele Fischarten, z.B. Heringe, haben im Frequenzbereich von einigen hundert Hz, in dem das spektrale Maximum der Rammgeräusche liegt, eine erheblich niedrigere Hörschwelle als Meeressäuger. Theoretisch können sie Rammgeräusche daher sehr viel "besser hören" als Schweinswale oder Seehunde. Felduntersuchungen zur Schädigung oder Verhaltensänderung von Fischen durch Rammgeräusche fehlen bislang weitgehend. Die Empfindlichkeit von Fischen gegenüber Rammgeräuschen ist Art- und Größenspezifisch. Grundsätzlich sind Hörschädigungen wie bei Meeressäugern zu erwarten. Starke Schallemissionen können bei Fischen zu deutlich erhöhter Sterblichkeit führen. Bei sehr kleinen Fischen tritt direkte Sterblichkeit durch Schalleinwirkungen ab etwa 195 dB auf (Einzelereignis-Schalldruckpegel  $L_E$ ), bei größeren Fischen oberhalb von 200 dB [Hastings & Popper 2005, s.a. Westerberg & Wahlberg 2005]. Im Nahbereich in 30 m Abstand von einer Offshore-Ramme wurden Einzelereignis-Schalldruckpegel  $L_E$  von etwa 190 dB gemessen [ISD, DEWI, ITAP 2006], wobei der Spitzenpegel 213 dB betrug, siehe Bild 2.4 und 2.5.

Das Umweltbundesamt hat als Richtwert für Rammgeräusche beim Bau von Offshore-WEA einen  $L_E$  von 160 dB re 1  $\mu$ Pa in 750 m Entfernung vorgeschlagen, der nicht überschritten werden soll [UBA 2003]. Dieser Wert wird auch vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Baugenehmigungen genannt und ergänzend dazu ein maximal zulässiger Spitzenpegel von 180 dB. Letzterer Wert kann dabei durchaus als ein sicherer Wert angesehen werden, unterhalb dessen eine Schädigung von Meeressäugern nicht zu erwarten ist.

## 2.3 Bei Offshore-Rammarbeiten gemessene Schallpegel

Bild 2.3 zeigt exemplarisch die Zeitfunktion des Schalldrucks eines Rammschlages, gemessen in 1600 m Entfernung von der Ramme [Betke et al. 2005]. Bei dieser Rammung wurde ein Messpfahl als Monopile-Konstruktion errichtet. Der Durchmesser des Pfahls betrug etwa 3.5 m, die Wassertiefe war 24 m. Die hydraulische Ramme war auf eine Schlagenergie von 550 kJ eingestellt und konnte maximal 800 kJ liefern.

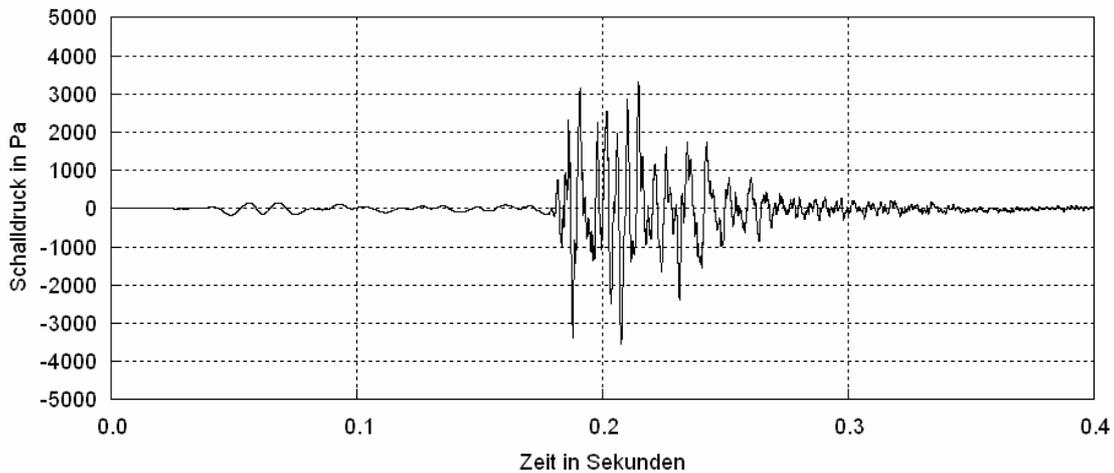


Bild 2.3. Schalldruckverlauf bei einem Rammschlag in 1600 m Entfernung von der Baustelle. Gerammt wurde ein Monopile von 3.5 m Durchmesser mit einer Schlagenergie von 550 kJ (Messung: DEWI / ISD / ITAP)

Der Spitzengegel ist für verschiedene Messentfernungen bis 33 km in Bild 2.4 aufgetragen, der Einzelereignis-Schalldruckpegel (breitbandig und in Oktavbändern) in Bild 2.5. Es handelt sich jeweils um Mittelwerte aus 10 aufeinander folgenden Schlägen. Die in Abschnitt 2.2 genannten Richtwerte wurden bei dieser Rammung deutlich überschritten. In Zukunft werden wegen des größeren Durchmessers der zu rammenden Pfähle noch stärkere Rammen erforderlich. Für die geplante Forschungsplattform FINO 3 werden beispielsweise Schlagenergien von 1600 kJ bis 1800 kJ diskutiert. Es ist deshalb mit nochmals 6 dB bis 10 dB höheren Pegeln zu rechnen. Teilweise trägt dazu auch die größere schallabstrahlende Fläche der größeren Pfähle bei.

Zur Abhängigkeit der Schallabstrahlung von der Schlagenergie wurden in diesem Projekt einige Versuche durchgeführt; siehe Abschnitt 5.2.

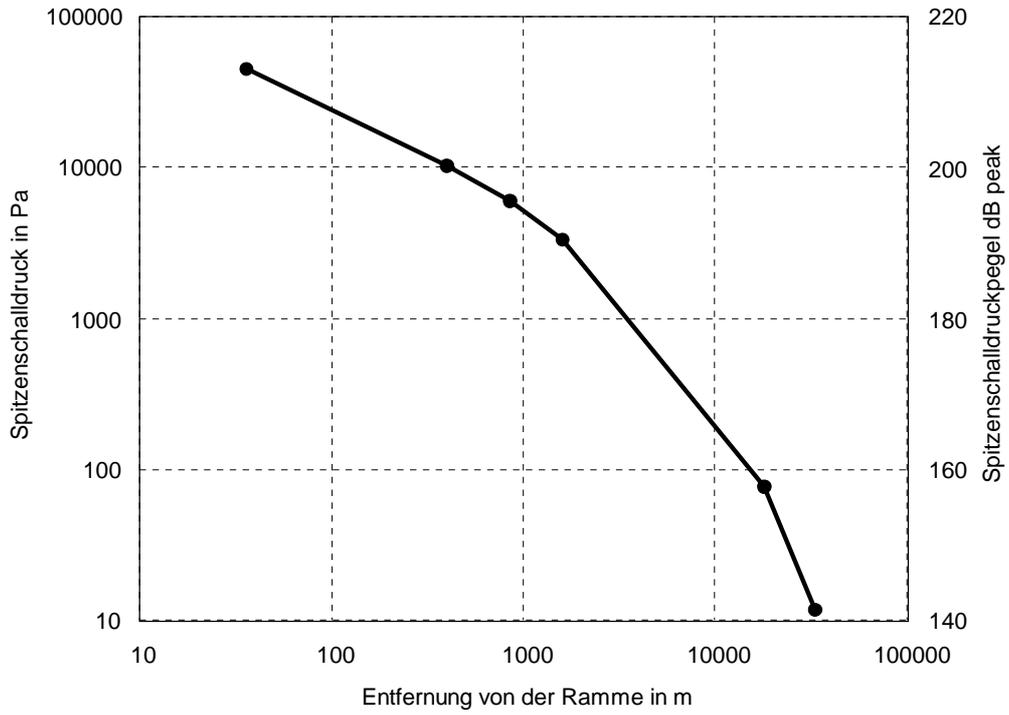


Bild 2.4. Spitzenpegel in Abhängigkeit von der Entfernung. Ramme wie in Bild 2.3

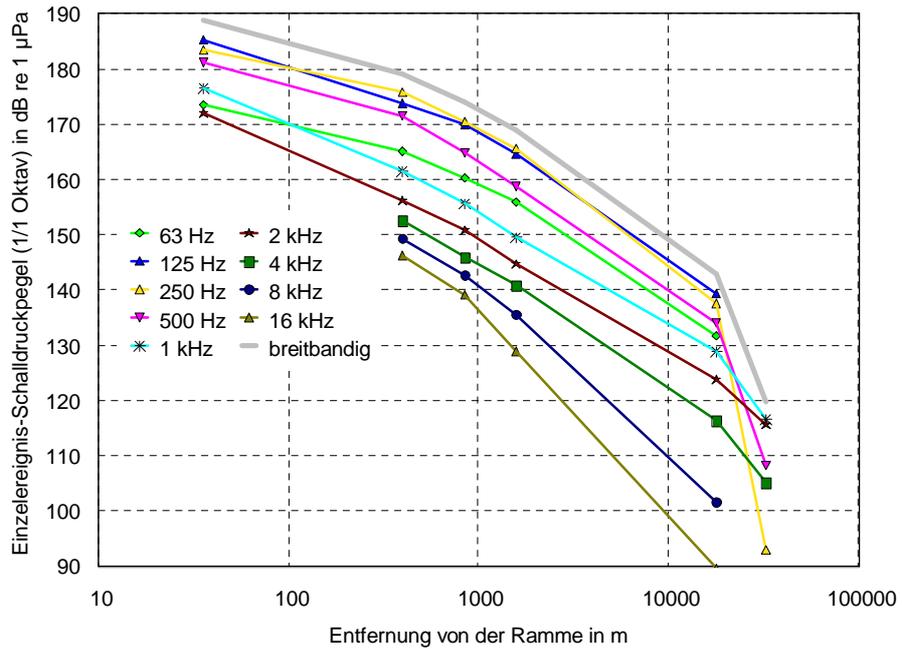


Bild 2.5. Schallereignispegel in Abhängigkeit von der Entfernung. Ramme wie in Bild 2.3

## **2.4 Verfahren zur Schallminderung beim Rammen**

### **2.4.1 Verlängerung der Schlagdauer**

Beim Schlag wirkt auf den Rammpfahl eine hohe Kraft für eine Zeitspanne von typisch einigen Millisekunden; der genaue Kraft-Zeit-Verlauf hängt unter anderem von der Beschaffenheit des Bodens und der Bauweise der Ramme ab. Wenn es gelänge, die Zeitdauer zu vergrößern, würde dies die Geräuschentwicklung verringern bzw. das Maximum der Schallabstrahlung zu tiefen Frequenzen hin verschieben, also in einen für Meeressäuger weniger relevanten Spektralbereich. Bei gleichbleibender Schlagenergie würde allerdings die Kraft im gleichen Verhältnis abnehmen wie die Schlagdauer vergrößert wird. Da aber eine Mindestkraft aufgebracht werden muss, um einen Pfahl in den Boden zu treiben, würde eventuell eine größere Ramme mit entsprechenden Reserven benötigt.

Eine Verlängerung der Schlagdauer beispielsweise von 4 ms auf 8 ms ist technisch nicht trivial. Eine theoretische Möglichkeit besteht darin, das Übergangsstück zwischen Hammer und Rammgut, als „weichere“ Feder auszubilden. Bislang ist diese meist glockenförmige Konstruktion auf ausreichende Festigkeit bei möglichst geringem Materialverbrauch optimiert. Dennoch kann sie bei großen Rammen 50 Tonnen und mehr wiegen; entsprechend hoch ist der Fertigungsaufwand.

Eine weitere Möglichkeit ist eine Zwischenlage aus vergleichsweise weichem Material. So wird bei Freifall-Rammen in offener Bauweise mitunter ein Schlagfutter aus Hartholz zwischen Hammer und Schlaghaube eingesetzt, allerdings nicht aus Gründen des Schallschutzes, sondern um die Kraft gleichmäßig zu verteilen. Inwieweit eine solche Zwischenlage den Lärm verringert, ist unklar. Bei den großen, geschlossenen Hydraulikrammen, wie sie für die Errichtung von Offshore-WEA benutzt werden, kann sie nach Auskunft eines Herstellers, der Rammen beider Systeme produziert, aus thermischen Gründen ohnehin nicht eingesetzt werden.

Praktische Versuche zur Minderung des Unterwasserschalls durch Verlängerung der Schlagdauer wurden bisher nicht durchgeführt.

### **2.4.2 Einsatz von Freifallrammen**

Bei Freifallrammen stammt die Schlagenergie einzig aus der potentiellen Energie eines aus bestimmter Höhe nahezu frei fallenden Gewichtes, im Gegensatz zu Hydraulikrammen, bei denen 30% bis 50% der Schlagenergie aus einer zusätzlichen Beschleunigung des Gewichtes resultieren.

Die Messungen dieses FuE-Vorhabens wurden mit einer Freifallramme ausgeführt. Nach Messungen im Rahmen eines laufenden BMU-Projektes bei der Errichtung des Messpfahl "Amrum-West" sind die Unterwasserschallpegel einer Freifallramme niedriger als bei einer Hydraulikramme. Auch wenn man die

gemessenen Pegel der Freifallramme auf die höhere Schlagenergie der Hydraulikramme bei "Amrum-West", die größere Wassertiefe und den größeren Pfahldurchmesser extrapoliert, d.h. die größere schallabstrahlende Fläche, ist die Freifallramme um 5 bis 8 dB leiser [ISD, DEWI, ITAP 2006].

Nachteilig ist bei Freifallrammen das – bei gleicher Schlagenergie – größere Gewicht gegenüber Hydraulikrammen. Außerdem gibt es nach Recherchen der Autoren zur Zeit keine Ausführungen, die für einen Betrieb unter Wasser geeignet sind, wie es bei Jacket-Gründungen erforderlich ist.

### **2.4.3 Einsatz von Vibrationsrammen**

Bei Offshore-WEAs, die nicht als Monopile-, sondern als Jacket-Konstruktion ausgeführt werden, ist der Durchmesser der zu rammenden Pfähle kleiner, meist unter 2 m. Hier ist ein Einsatz von Vibrationsrammen (Rüttlern) anstelle von Schlagrammen möglich. Vibrationsrammen enthalten mehrere gegenläufig rotierende, exzentrische Massen, so dass wie bei der Schlagramme nur eine vertikale Kraft auf das Rammgut wirkt. Typische Drehfrequenzen sind 20 Hz – 40 Hz.

Beim Vibrationsrammen ist die Reibung zwischen Rammgut und Boden stark herabgesetzt, so dass unter optimalen Bedingungen der Rammvorgang schneller als mit einer Schlagramme abläuft. Die Geräuschentwicklung, insbesondere der Spitzenpegel, ist bei sachgemäßem Betrieb deutlich geringer.

Dem stehen verschiedene Nachteile gegenüber. So treten bisweilen Resonanzen im Pfahl oder im Boden auf, welche die zum Vortrieb benötigte Energie aufzehren und auch zu starken Erschütterungen und dadurch zu Schäden führen können. Diese Gefahr des „Steckenbleibens“ lässt sich durch moderne Vibrationsrammen mit variablem Moment und variabler Frequenz verringern. Gemessen am gut etablierten Schlagrammverfahren gibt es dazu im Offshore-Bereich allerdings kaum Erfahrungen. Der wesentliche Nachteil der Vibrationsramme ist, dass beim jetzigen Stand der Technik die Tragfähigkeit nur bei der Schlagrammung sicher feststellbar ist. Bei vibrationsgerammten Pfählen muss deshalb abschließend mit Hilfe einer Schlagramme die Festigkeit des Pfahls im Boden sichergestellt werden. Aus diesen Gründen bevorzugen Offshore-Baufirmen meistens von vornherein die bewährte Schlagrammtechnik.

### **2.4.4 Schallschirme und Schallkapseln**

Die Kapselung von Maschinen ist eine gängige Schallschutzmaßnahme. Im Prinzip ist das auch bei Wasserschall möglich. Das Material der Wände, mit denen die Schallquelle umgeben wird, muss sich in der Schallkennimpedanz möglichst stark von der des Mediums unterscheiden (die Impedanz ist das Produkt aus der Schallgeschwindigkeit im Material und der Dichte des Materials). Bei Luftschall bewirken daher schwere Materialien eine gute Schallisolation. Für Wasserschall sind Metalle, Mauerwerk etc. relativ

durchlässig, da sich deren Dichte vergleichsweise wenig von der des Wassers unterscheidet. Dagegen ist eine Schicht aus lufthaltigem Material schon bei geringer Dicke sehr wirksam. Das in diesem Projekt erprobte Verfahren beruht auf diesem Prinzip.

Bei gegebenem Material ist der Schalldurchgang um so geringer, je dicker die Schicht ist. Wichtig ist außerdem, dass keine Öffnungen vorhanden sind. Schließlich ist die Wirkung einer Kapselung noch davon abhängig, wie stark der Schall im Inneren absorbiert, d.h. in Wärme umgewandelt wird. Je schlechter die Absorption, umso mehr steigt der Schalldruck innerhalb der Kapsel und verringert so deren Isolationswirkung. Deshalb werden Schallkapseln für Luftschall zumindest teilweise mit absorbierenden Materialien ausgekleidet. Für Wasserschall existieren jedoch kaum brauchbare Absorber. Ein Schallfeld setzt sich aus Schalldruck und Schallschnelle zusammen und Schallabsorber wirken überwiegend auf die Schnellekomponente; beim Wasserschall ist die Schnelle erheblich geringer als beim Luftschall. Im vorliegenden Fall verbleibt die schwer abschätzbare Absorption durch die Abschirmung und das Rammgut selbst. Die Wirksamkeit einer Kapselung ist deshalb zuverlässig nur experimentell zu ermitteln.

#### **2.4.5 Blasenschleier**

Bei dieser Art der Schallminderung, die ebenfalls den Schallschirmen zuzurechnen ist, lässt man um die Ramme herum Luftblasen im Wasser aufsteigen. Die Wirkung des Blasenschleiers beruht überwiegend auf Schall*streuung*. Der Streuquerschnitt von Luftblasen im Wasser ist um ein Vielfaches größer als ihr geometrischer Querschnitt. Dadurch hat der Blasenschleier theoretisch ein großes Potenzial zur Schalldämmung. Allerdings ist die scheinbare Vergrößerung nur in einem engen Frequenzbereich wirksam, der vom Durchmesser der Blasen abhängt [Medwin et al. 2005, S. 182ff, S. 195ff]. Werden diese und weitere physikalischen Zusammenhänge nicht beachtet, muss das Ergebnis zwangsläufig zufällig ausfallen. Sofern für Blasenschleier überhaupt konkrete Schalldämmmaße angegeben werden [z.B. Illingworth & Rodkin 2001, Würsig et al. 2000], erreichen die Maximalwerte etwa 10 dB, bei einzelnen Frequenzen bis 20 dB. Der technische Aufwand für die teilweise in zwei Tiefen angeordnete Blasenerzeugung war generell hoch.

Das spektrale Maximum der Rammgeräusche liegt bei einigen hundert Hertz. Um auch bei diesen niedrigen Frequenzen eine optimale Wirkung zu erzielen, müssen Blasen mit einem Durchmesser bis zu etwa 5 cm erzeugt werden. Zu berücksichtigen ist bei der Auslegung, dass die Blasen beim Aufstieg im Wasser größer werden und dass große Blasen schneller aufsteigen als kleine. In der Nordsee kommt als weiteres, erhebliches Problem die praktisch ständig vorhandene Gezeitenströmung hinzu. Wie bei anderen Schallschirmen gilt auch beim Blasenschleier, dass der Pegel auf der Innenseite, also zum Rammpfahl hin, durch die Abschirmung ansteigt, wodurch die Schalldämmung geringer ausfällt als es die Streutheorie vorhersagt.

### 3. Physikalische Beschreibung des untersuchten Verfahrens

Das Prinzip wurde schon in Abschnitt 2.4.4 kurz dargelegt. Zur physikalischen Beschreibung wird zunächst der in Bild 3.1 skizzierte einfache Fall einer ebenen Schallwelle betrachtet, die senkrecht auf eine Grenzschicht zwischen zwei Medien auftrifft. Die Medien sind durch ihre Schallkennimpedanzen  $Z_i = \rho_i c_i$  charakterisiert, wobei  $\rho_i$  die Dichte des jeweiligen Mediums ist und  $c_i$  die Schallgeschwindigkeit. Ein Teil des Schalls dringt ins Medium 2 ein, ein Teil wird zurück ins Medium 1 reflektiert. Der Reflexionsfaktor ist gegeben durch [z.B. Henn et al. 1999, S. 234ff]

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.1)$$

Wie probeweises Einsetzen zeigt, geht  $r \rightarrow +1$  für  $Z_2 \gg Z_1$  und  $r \rightarrow -1$  für  $Z_2 \ll Z_1$ . Der Betrag des Reflexionsfaktors wird also maximal, wenn sich  $Z_1$  und  $Z_2$  so stark wie möglich unterscheiden. Der Schalleintrag ins Medium 2, d.h. die energetische Größe *Transmissionsgrad*

$$t = 1 - |r|^2 \quad (3.2)$$

wird dann minimal.

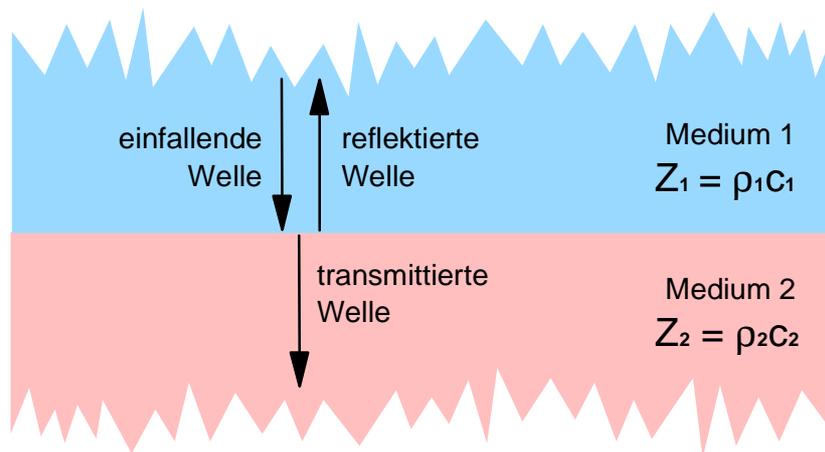


Bild 3.1. Ebene Schallwelle an einer Grenzschicht

In Tabelle 3.1 sind Transmissionsgrade für den Übergang von Wasser in verschiedene Medien aufgelistet. Die schlechteste Schallübertragung ergibt sich von Wasser nach Luft. Aber auch in einen lufthaltigen Schaum mit einer Dichte von  $30 \text{ kg/m}^3$  wird wenig Wasserschall weitergeleitet.

Medium	Dichte, kg/m <sup>3</sup>	Schallgeschw., m/s	Schallkennimpedanz Z, kg s/m <sup>2</sup>	Z / Z <sub>Wasser</sub>	Transmissionsgrad
Wasser	1000	1500	1 500 000	1	1.000
Gummi	1400	100	140 000	1 / 11	0.312
Stahl	7800	5000	39 000 000	26	0.142
Luft	1.3	340	440	1 / 3400	0.001
Schaum	30	340	10 200	147	0.027

Tabelle 3.1. Transmissionsgrade für den Übergang von Wasser in verschiedene Medien

Bild 3.2 zeigt ein gegenüber Bild 3.1 erweitertes Modell aus drei Schichten. Der Reflexionsfaktor ist jetzt [Jensen et al. 1994, S. 50]

$$r = \frac{Z_2(Z_3 - Z_1) - i(Z_2^2 - Z_1Z_3) \tan f_2}{Z_2(Z_3 + Z_1) - i(Z_2^2 + Z_1Z_3) \tan f_2} \quad (3.3)$$

mit  $\phi_2 = k_2 h_2 \cos \theta_1$ . Hierin ist  $k_2$  die Wellenzahl  $2\pi f/c_2$  mit der Frequenz  $f$  in Hz. Für den Transmissionsgrad gilt wie vorher Gl. (3.2).

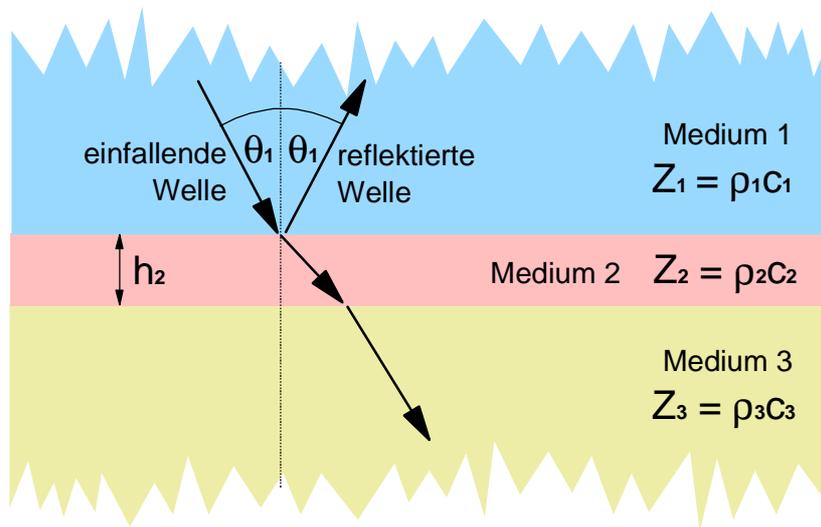


Bild 3.2. Eine Schallwelle trifft auf eine Schicht mit endlicher Dicke  $h_2$ .

Mit Hilfe von Gl. (3.3) berechnete Transmissionsgrade für verschiedene Materialien und Schichtdicken von Medium 2 sind in Bild 3.3 dargestellt. Die Kurven gelten für Medium 1 = Medium 3 = Wasser und für senkrechten Schalleinfall ( $\theta_1 = 0$ ).

Die einfache Theorie berücksichtigt nicht die innere Dämpfung der Materialien, wodurch sie in Bild 3.3 bei hohen Frequenzen teilweise sehr "durchlässig" erscheinen. Diese  $\lambda/4$ -Resonanzen sind in der Realität sehr viel schwächer.

Ebenfalls nicht berücksichtigt ist der bereits in Abschnitt 2.4 erwähnte Effekt, dass der Pegel innerhalb einer Schallkapsel ansteigt, wodurch das Schalldämmmaß verringert bzw. der Transmissionsgrad auf einen Wert  $\tau'$  erhöht wird:

$$t' = \frac{a+t}{t} \quad 3.4$$

Dabei ist  $\tau$  der Transmissionsgrad nach Gl. (3.2). Die Formel gilt für mittlere Werte des Absorptionsgrades  $\alpha$  und setzt eigentlich ein diffuses Schallfeld voraus, erlaubt aber auch eine Abschätzung bei nicht-diffusen Schallfeldern [Lotze 1996, S. 271ff]. Für den Fall der 20 mm dicken Schaumschicht aus Bild 3.3 sind die resultierenden Werte in Bild 3.4 für einige Werte von  $\alpha$  aufgetragen.

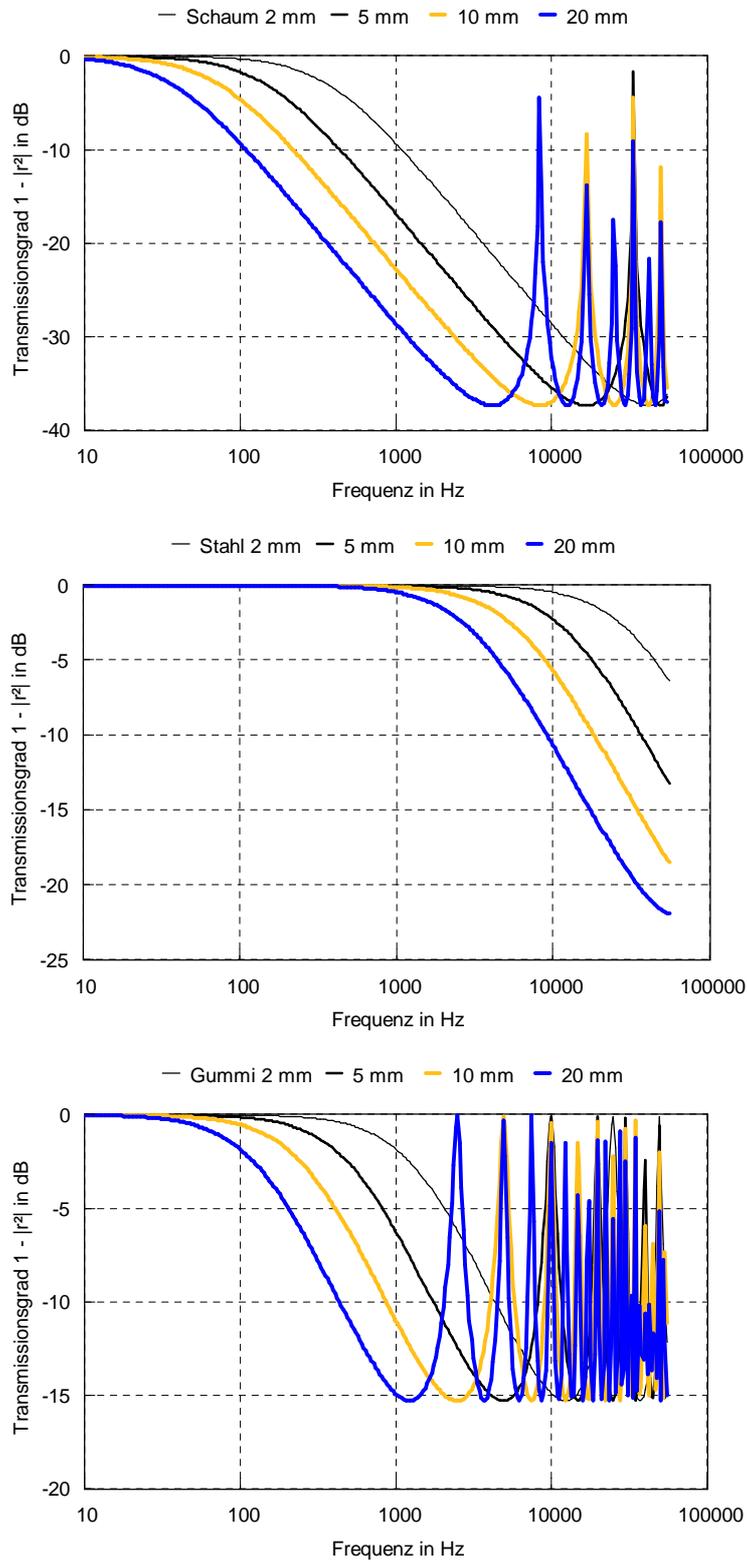


Bild 3.3. Transmissionsgrade für verschiedene Arten von Medium 2 in Bild 3.2 (Medium 1 = Medium 3 = Wasser). Oben: Lufthaltiger Schaum mit 30 kg/m<sup>3</sup>, Mitte: Stahl, unten: Gummi. Die Kurven gelten für senkrechten Schalleinfall.

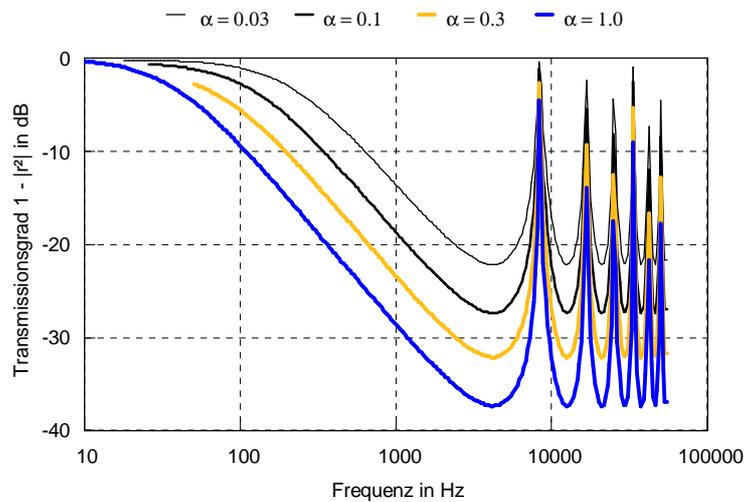


Bild 3.4. Transmissionsgrade für lufthaltiger Schaum mit  $30 \text{ kg/m}^3$  und 20 mm Dicke, aber bei Absorptionsgraden  $\alpha < 1$  innerhalb der Schallkapsel. Die Kurve für  $\alpha = 1$  ist mit der Kurve in Bild 3.3 oben für 20 mm identisch.

## 4. Durchführung der Erprobung

### 4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Bild 4.1 dargestellt. Über einen Rammpfahl wurden verschiedene Schallschutzhüllen gestülpt. Die Ramme war eine Freifall-Ramme des Typs Menck MHF 10-20. Diese Ramme hat einen Fallkörper von 20000 kg, die größte Fallhöhe ist 110 cm. Damit ergibt sich eine maximale Schlagenergie von rund 200 kJ. Der kleinste einzustellende Wert liegt bei 37 kJ. Das Gesamtgewicht der Ramme beträgt 46 Tonnen.

Als Rammpfahl wurde ein Testpfahl der Menck GmbH benutzt, welcher 1986 in der Lübecker Bucht errichtet wurde, um dort größere Rammgeräte zu erproben (Bild 4.2). Die Daten des Pfahls sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Der Bewuchs aus Muscheln und Tang wurde vor den Messungen am 11.11.2005 durch die Baltic Taucherei- und Bergungsbetrieb GmbH entfernt.

Am 17.11.2005 wurde als Arbeitsplattform der Stelzenponton JB6189 der F+Z Bau GmbH vor Ort installiert (Bild 4.3); der Ponton verblieb dort in unveränderter Position bis zum Ende der Messungen am 22.11.2005. Auf den Pfahl wurde zunächst ein Anpassstück (sog. Follower) für die Ramme gesetzt (Bild 4.4) und dort ebenfalls für die Dauer der Messkampagne belassen. Der Follower hatte eine Masse von ca. 27 Tonnen.

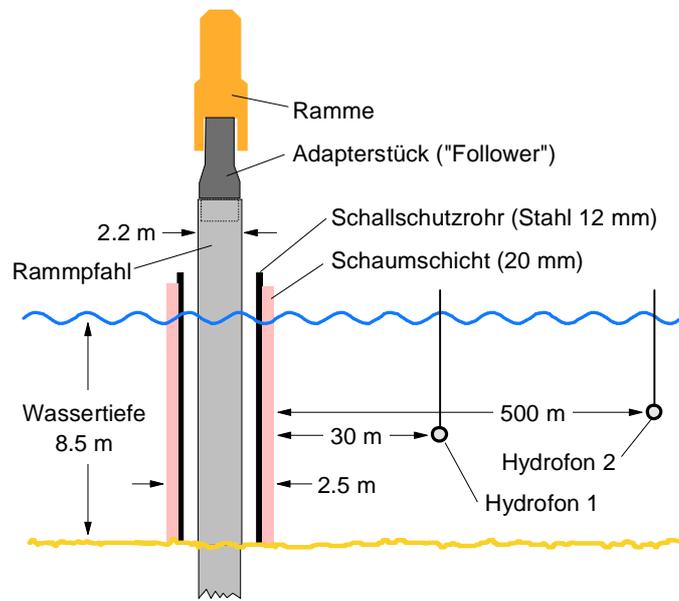


Bild 4.1. Versuchsaufbau



Bild 4.2. Der Testpfahl der Firma Menck in der Nähe von Travemünde

Position	53°59.9'n 10°54.6'e
Durchmesser	2.2 m
Höhe über der Wasserlinie	5.5 m
Wassertiefe	8.5 m
Länge im Meeresboden	ca. 65 m
Wandstärke	50 mm

Tabelle 4.1. Daten des Testpfahls



Bild 4.3. Stelzenponton JB6189. Links der Testpfahl mit aufgesetztem Follower



Bild 4.4. Links: Aufsetzen des Followers. Rechts: Pfahl mit Follower und Ramme

Wie in Bild 4.1 dargestellt, wurde der Unterwasserschall an zwei Positionen gemessen, die in Bild 4.5 genauer spezifiziert sind. Hydrofon 1 (B&K 8105) war für Kontrollzwecke vorgesehen und an der dem Pfahl gegenüberliegenden

Seite des Pontons an fester Position installiert. Hydrofon 2 (Reson TC4033) wurde von Bord des Begleitschiffs abgesenkt. Da Ankern sich aus technischen Gründen als schwierig erwies, wurde frei treibend gemessen und die Entfernung zum Pfahl mit Hilfe von GPS und Radar protokolliert.

Beide Hydrofone waren mit Ladungsverstärkern (B&K 2635) verbunden, deren Ausgangssignale mit 20 kHz Bandbreite aufgezeichnet wurden. Auf dem Ponton wurde ein DAT-Rekorder (Tascam DA-P1) verwendet, auf dem Schiff ein Rekorder mit Compact-Flash-Karte als Speichermedium (Marantz PMD 671). Zur absoluten Kalibrierung wurden 1-kHz-Töne mit  $100 \text{ mV}_{\text{RMS}}$  aufgezeichnet.

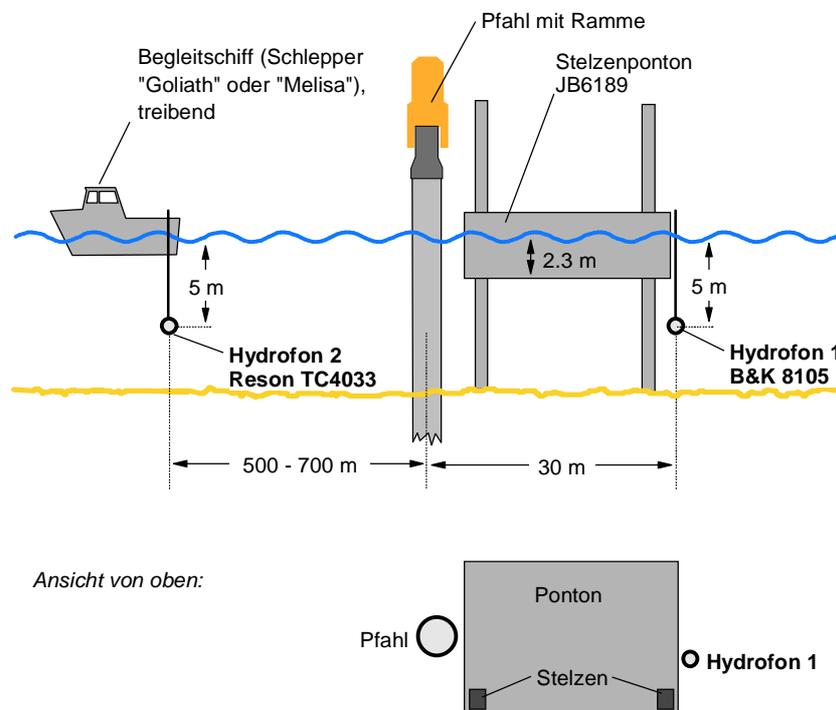


Bild 4.5. Positionen der Hydrofone

## 4.2 Ablauf der Messung

Außer dem schaumbeschichteten Schallschutzrohr wurde das Stahlrohr ohne Schaumschicht vermessen sowie ein Schallschutz-Vorhang aus 5 mm starkem Gummi. Als Referenz wurden Messungen der Rammgeräusche mit dem Pfahl ohne Schallschutz vorgenommen. Es ergab sich damit die Abfolge der Messungen in Tabelle 4.2; die vier Konfigurationen sind noch einmal in Bild 4.6 skizziert. Bei jeder Messung wurden jeweils 10 bis 20 Schläge mit den Rammenergien 38 kJ, 50 kJ, 100 kJ und 200 kJ ausgeführt. Die Schläge wurden einzeln per Handsteuerung in Abständen von 5 s bis 8 s ausgelöst.

Messung Nr.	Art der Messung	Skizze in Bild 4.6	Datum
1	Referenzmessung "nackter Pfahl"	A	17.11.2005
2	Schallschutzrohr mit Schaum	B	"
3	Schallschutzrohr, Schaum entfernt	C	"
4	Schallschutzvorhang	D	22.11.2005
5	Referenzmessung (wie Nr. 1)	A	"

Tabelle 4.2. Abfolge der Messungen

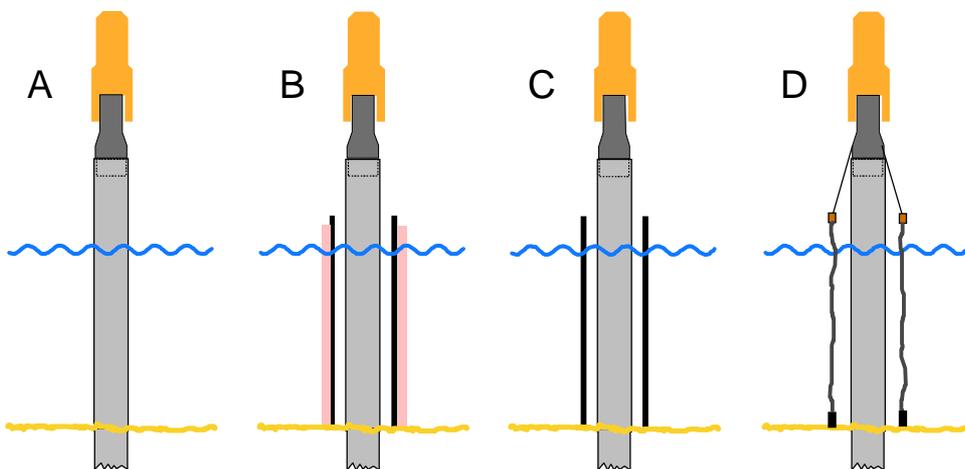


Bild 4.6. Messkonfigurationen. A: Referenzmessung, B: Schallschutzrohr mit Schaumschicht, C: Schallschutzrohr ohne Schaum, D: Schallschutzvorhang aus Gummi.

### 4.3 Schallschutzrohr mit Schaumbeschichtung

Auf ein Stahlrohr als Träger wurde geschlossenzelliger Polyethylenschaum aufgebracht. Das Rohr wurde von der F+Z Bau GmbH beschafft. Es hatte 2.4 m Durchmesser, 12 mm Wandstärke und 12 m Länge. Das Schaummaterial (GEFICELL TDZ 6.0-1.0, Hersteller: Unidek Deutschland GmbH, 33803 Steinhagen) wird als Folie von 1.40 m Breite geliefert, die im unbelasteten Zustand etwa 6 mm dick ist. Das Material lässt sich relativ unproblematisch entsorgen.

Da die Folie durch den Wasserdruck ihr Volumen verringert, wurde sie im unteren Bereich des Rohres in 7 Lagen gewickelt, in der Mitte in 6 und oben in 5 Lagen. Sie wurde zunächst mit Klebeband und Stretchfolie fixiert und abschließend mit Spanngurten gesichert (Bild 4.7). Für die Transporthalterung an Bord des Pontons, auf der das Rohr durch Schweißen gesichert wurde, blieben am unteren Ende des Rohres 40 cm frei. Dies wurde als unkritisch erachtet, da das Rohr beim Absetzen ohnehin etwas im Meeresboden einsinkt. Im Innern des Rohres wurden in Längsrichtung acht 36 mm starke Taue aus

Polyester als Abstandshalter zum Rammpfahl verspannt (Bild 4.8). Bevor das Rohr zur Messung über den Pfahl gestülpt (Bild 4.9) und die Ramme aufgesetzt wurde, wurde es probeweise ins Wasser gesenkt, um die Befestigung der Schaumschicht zu überprüfen.

#### 4.4 Rohr ohne Beschichtung

Unmittelbar nach der Messung am beschichteten Rohr und Sicherung der Daten wurde die Schaumschicht an Bord des Pontons entfernt (Bild 4.10) und das Rohr wie vor vermessen.



Bild 4.7. Das mit PE-Schaumfolie beschichtete Rohr



Bild 4.8. Taue als Abstandshalter zum Rammpfahl

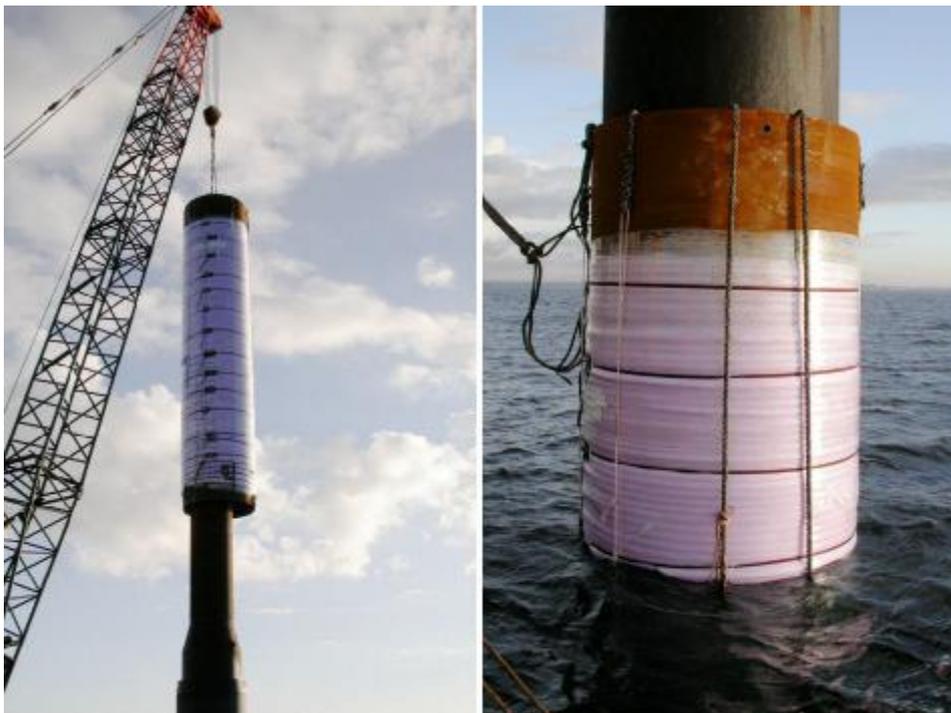


Bild 4.9. Das Schallschutzrohr am Kran und in der Messposition



Bild 4.10. Entfernen der Beschichtung

## 4.5 Schallschutzvorhang

Der Schallschutzvorhang wurde in Anlehnung an ähnliche Vorrichtungen gebaut, wie sie teilweise zur Luftschalldämmung beim Rammen an Land eingesetzt werden. Meist bestehen sie aus 3 mm bis 6 mm starkem gummiartigem Material.

Für die hier untersuchte Konstruktion wurde 5 mm starkes Gummi (Neoprene CR) mit einer Dichte von rund  $1400 \text{ kg/m}^3$  gewählt. Sie war als Schlauch mit quadratischem Querschnitt von  $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  ausgeführt, bei einer Länge bzw. Höhe von 10 m (Bild 4.12). Dazu waren 8 Bahnen à  $1.40 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  überlappend verklebt. Zur Stabilisierung der Form und um ein sicheres Absinken bis zum Meeresboden zu gewährleisten, war das untere Ende jeder Seite mit zwei Flachstählen von  $8 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  verschraubt. Mit diesen 80 kg Ballast betrug das Gewicht der gesamten Konstruktion etwa 900 kg. Um das Verladen zu erleichtern, wurde ein Wickelkern aus Holz angefertigt (Bild 4.11).

Die Installation am Rammpfahl erwies sich zunächst als schwierig. Ursprünglich war geplant, den Vorhang mit Seilen am Follower zu befestigen. Dazu hätte ein Mannkorb eingesetzt werden müssen, während der Vorhang am Kran hängt. Mit dem vorhandenen Hebezeug des Pontons war dies nicht gleichzeitig möglich. Deshalb wurde an Bord ein Haltering angefertigt, der unterhalb des konischen Teils des Followers auflag und so den Vorhang hielt. Zur Herstellung wurde ein Stück vom nicht mehr benötigten Schallschutzrohr abgetrennt. Der Haltering ist links in Bild 4.12 oberhalb des Vorhangs zu erkennen.



Bild 4.11. Schallschutzvorhang auf Transportrolle



Bild 4.12. Schallschutzvorhang am Kran und in Messposition

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Auswertung der akustischen Daten

Die Aufnahmen wurden abschnittsweise für jede der Messungen, jede der vier Schlagenergien und jede der beiden Hydrofonpositionen in WAV-Dateien gespeichert. Damit enthielt jede der 40 Dateien 10 bis 15 Rammschläge. Durch eine Hochpass-Filterung (Grenzfrequenz 20 Hz, Butterworth-Filter 6. Ordnung) wurden zunächst die typischen durch Wind und Seegang erzeugten tieffrequenten Signalanteile abgeschwächt. Um den Einfluss etwaiger Störgeräusche zwischen den Schlägen zu minimieren, wurden die Rammimpulse sodann mit einer Gewichtung nach Bild 5.1 versehen.

Danach wurde mit Hilfe eines in MATLAB geschriebenen Programms jeweils aus 10 Schlägen der mittlere Schallereignispegel nach Gl. (2.5) mit einem FFT-Verfahren ermittelt. Zunächst wurde ein Spektrum durch eine FFT der Länge  $2^{22}$  oder  $2^{23}$  (ca.  $4 \times 10^6$  bzw.  $8 \times 10^6$  Punkte) berechnet und anschließend in 1/3-Oktav-Werte umgerechnet. Wegen der hohen Frequenzauflösung ( $\leq 2^{-22} f_s$ , mit  $f_s = 44100$  Hz) ist diese Umrechnung auch bei niedrigen Frequenzen sehr genau. Die Ergebnisse der Analyse wurden stichprobenartig mit Hilfe eines Spektrumanalysators (HP35670a Dynamic Signal Analyzer) verifiziert.

Die so gewonnenen Schallereignispegel sind in Bild 5.4 und 5.5 dargestellt. In den Diagrammen eingetragene Schlagenergien sind aus dem Rammprotokoll berechnete Mittelwerte. Für die Auswertung der Versuche mit Schallschutzrohr und Schallschutzvorhang wurden die vom Schiff aus gemessenen Daten in Bild 5.5 benutzt, und zwar die Aufnahmen mit 50 kJ bis 200 kJ Schlagenergie, da diese den größten Störabstand hatten. Die Schiffsmessungen fanden in einem für die Fragestellung relevanten Entfernungsbereich statt, außerdem können keine Fehler durch Nahfeld-Effekte oder versteckte Schallwege über den Ponton-Schiffskörper auftreten.

Nachteilig bei der Schiffsmessung ist die etwas schlechtere Reproduzierbarkeit bei tiefen Frequenzen. Diese hat zwei Gründe: Erstens ist die Schallausbreitung über den Meeresboden (Bild 5.2) beim Testpfahl relativ stark ausgeprägt (verglichen z.B. mit Bild 2.3), vermutlich wegen der großen Länge im Boden und wegen des im Gegensatz neu gerammten Pfählen innigeren Kontaktes mit dem Sediment. Zweitens nimmt der Pegel nicht stetig mit der Entfernung ab, sondern schwankt periodisch mit der Entfernung (Bild 5.3). Es handelt sich dabei um eine Eigenschaft des aus Wasseroberfläche und Meeresboden gebildeten Wellenleiters, durch die es wegen unterschiedlicher Positionen des Schiffes während der Messung z.B. des Rohres und der zugehörigen Referenzmessung zu Schwankungen der Messwerte kommen kann. Die Messungen und Berechnungen aus Bild 5.3 gelten allerdings für eine ganz bestimmte Frequenz. Bei größerer Bandbreite wie den in dieser Untersuchung benutzten Terzen sind die Pegelabweichungen deutlich geringer. Weiterhin ist anzunehmen, dass der Effekt bei einer ausgedehnten Schallquelle wie einem

Rammpfahl nochmals deutlich geringer ausgeprägt ist. Dennoch sollten bei zukünftigen Messungen ein oder mehrere Hydrofone in einigen 100 Metern Entfernung vom Rammpfahl ortsfest installiert werden.

Die einfache Pegelabnahme mit der Entfernung wurde durch Normierung auf eine Entfernung von 500 m berücksichtigt, wobei eine Abnahme von  $15 \log(r_1/r_2)$  angesetzt wurde.

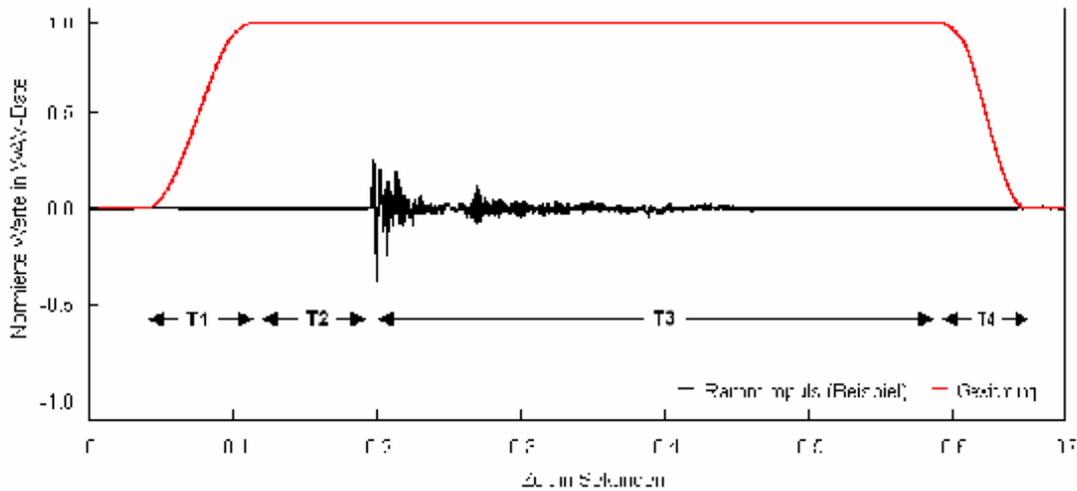


Bild 5.1. Gewichtung der Rammimpulse zum Ausblenden von Störgeräuschen zwischen den Schlägen.  $T_1 = T_2 = T_4 = 75$  ms,  $T_3 = 400$  ms.

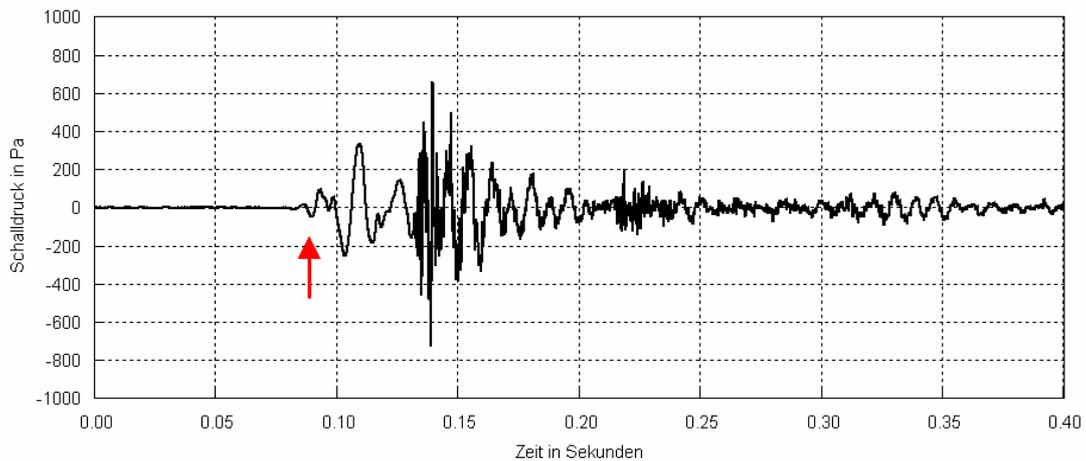


Bild 5.2. Zeitfunktion eines Rammimpulses in 600 m Abstand vom Testpfahl; die Schlagenergie betrug 200 kJ. Im Sediment ist die Schallgeschwindigkeit höher als im Wasser, weshalb der über den Boden zum Empfänger gelangende Schall früher eintrifft (Pfeil) als der reine Wasserschall, der etwa bei 0,13 s einsetzt. Diese seismische Komponente war beim Testpfahl besonders stark ausgeprägt. Das Maximum dieses Signalanteils liegt bei 70 Hz.

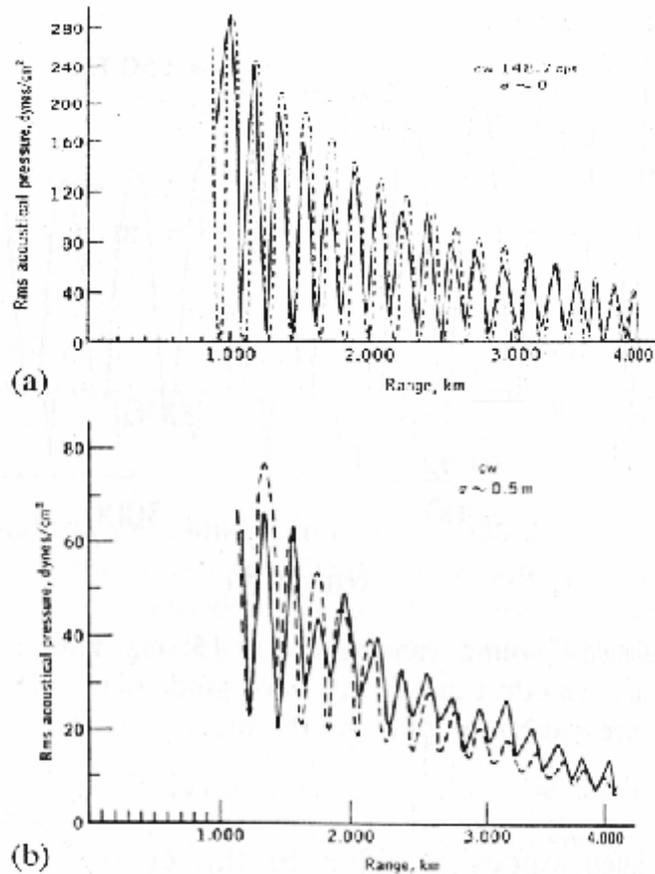
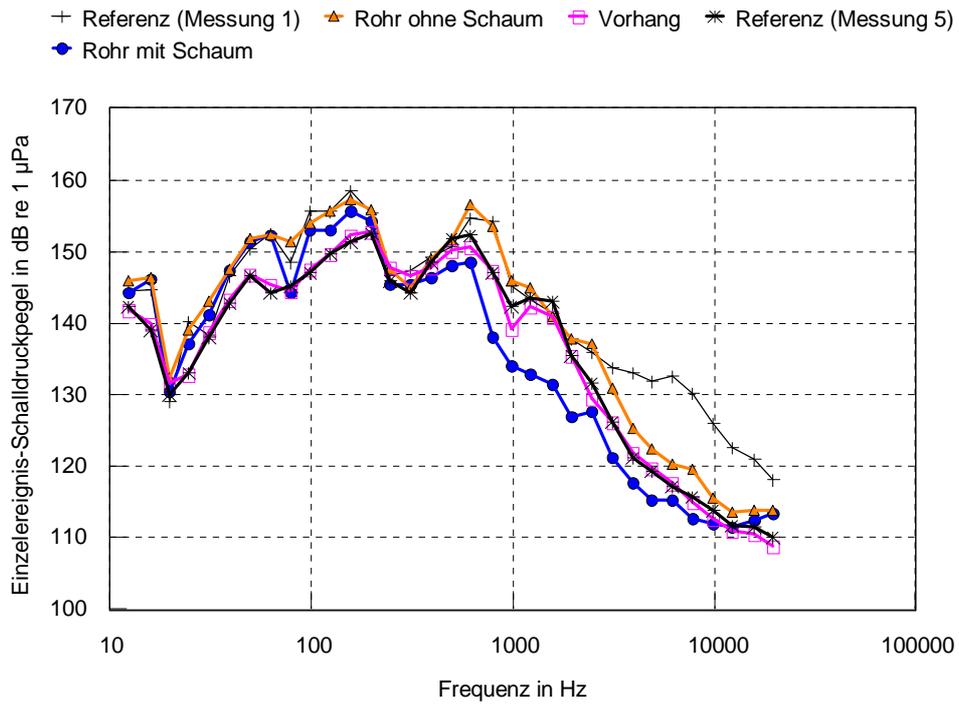


Bild 5.3. In dem durch Meeresoberfläche und Meeresboden gebildeten Schallkanal nimmt die Amplitude vom Sender zum Empfänger nicht monoton ab, sondern schwankt periodisch mit der Entfernung, wobei sich je nach Frequenz, Wassertiefe und Zustand der Wasseroberfläche und des Bodens ein anderes Muster ergibt. Rechnung (gestrichelt) und Messung (durchgezogene Kurve) für eine Frequenz von etwa 150 Hz und Entfernungen bis 4 km. Oben bei glatter See, unten bei einer Wellenhöhe von 0.5 m. Sendertiefe 10 m, Empfängertiefe ca. 20 m. Aus [Medwin & Clay 1998, S. 486].

Ponton -- 38 kJ



Ponton -- 51 kJ

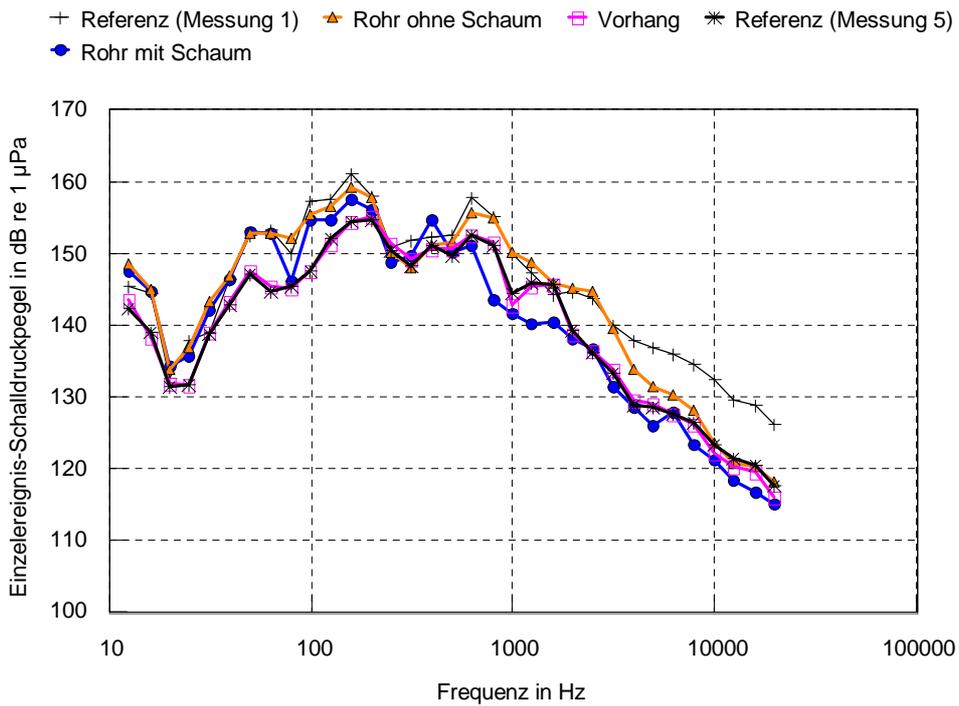
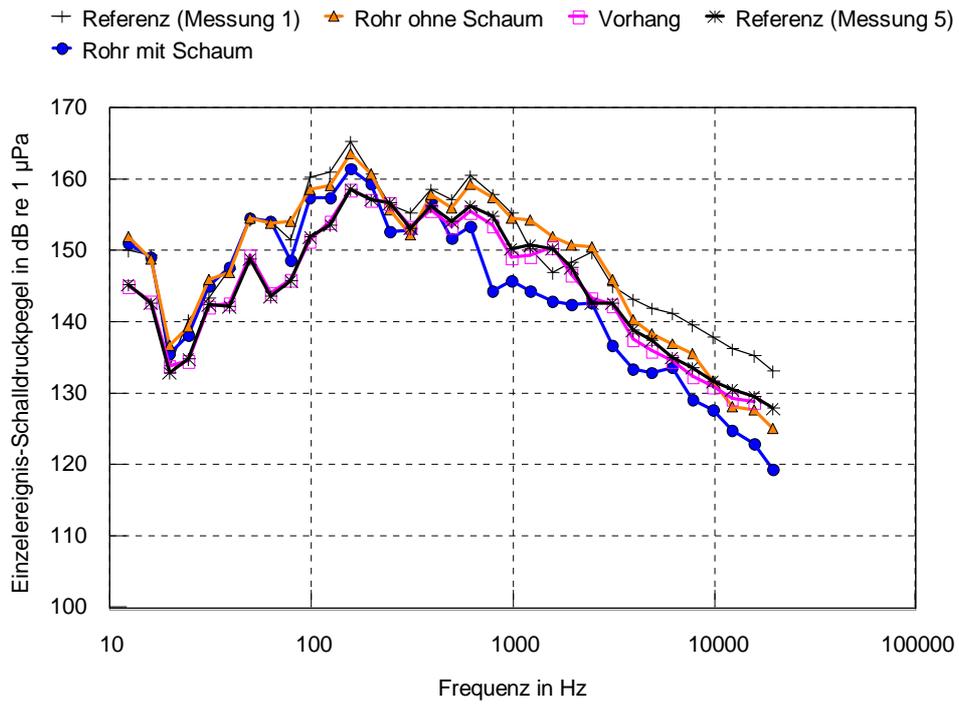


Bild 5.4a. Einzelereignispegel für alle Konfigurationen; Messentfernung 30 m

Ponton -- 100 kJ



Ponton -- 196 kJ

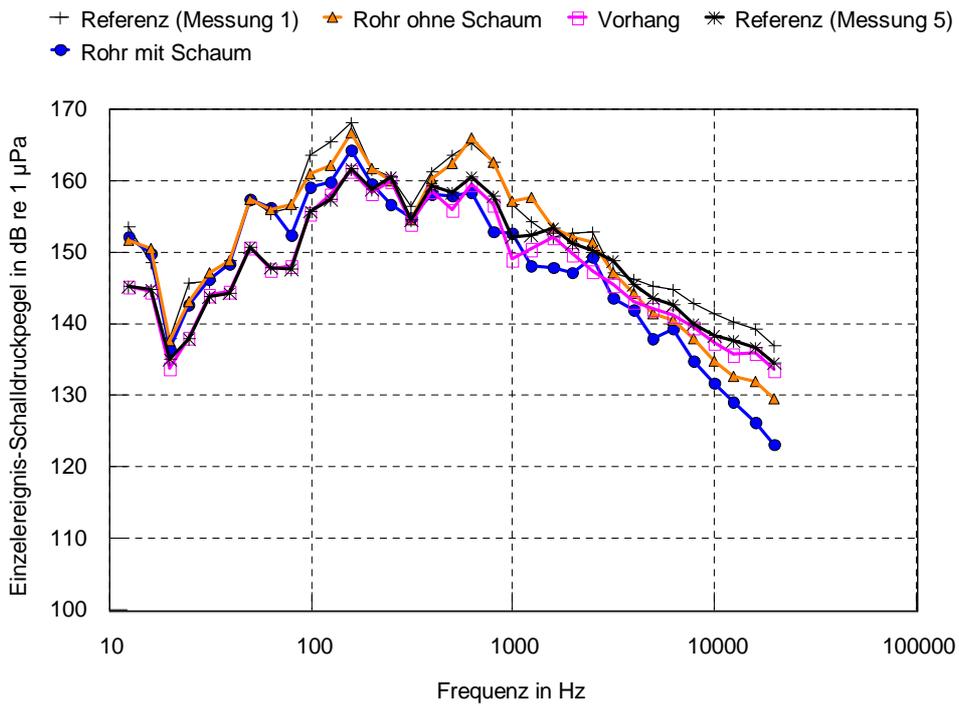
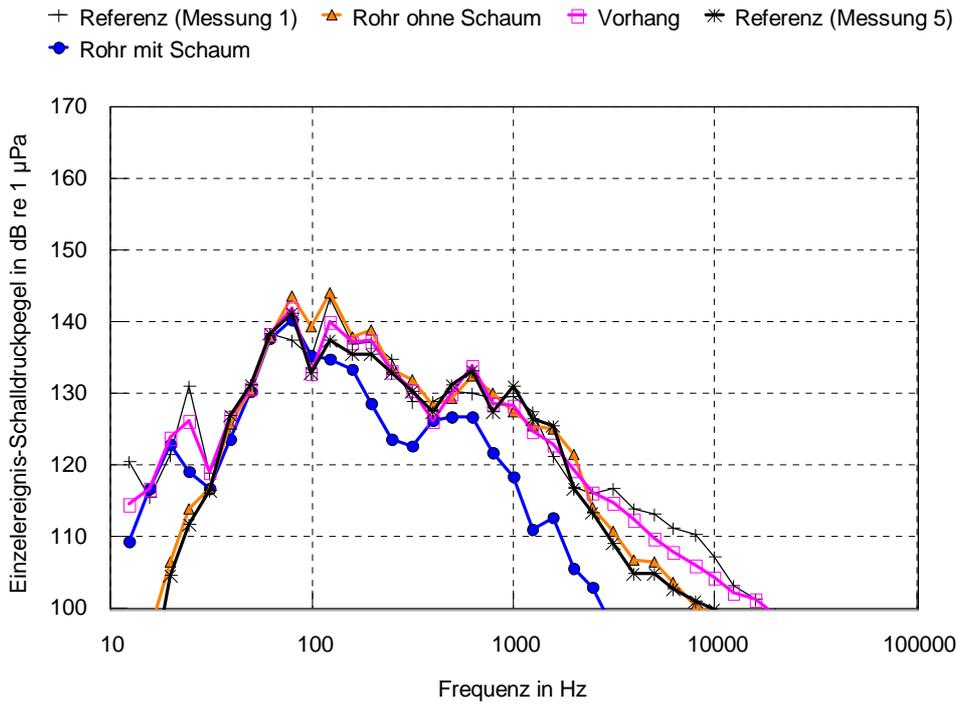


Bild 5.4b. Einzelereignispegel für alle Konfigurationen; Messentfernung 30 m

Schiff -- 38 kJ



Schiff -- 51 kJ

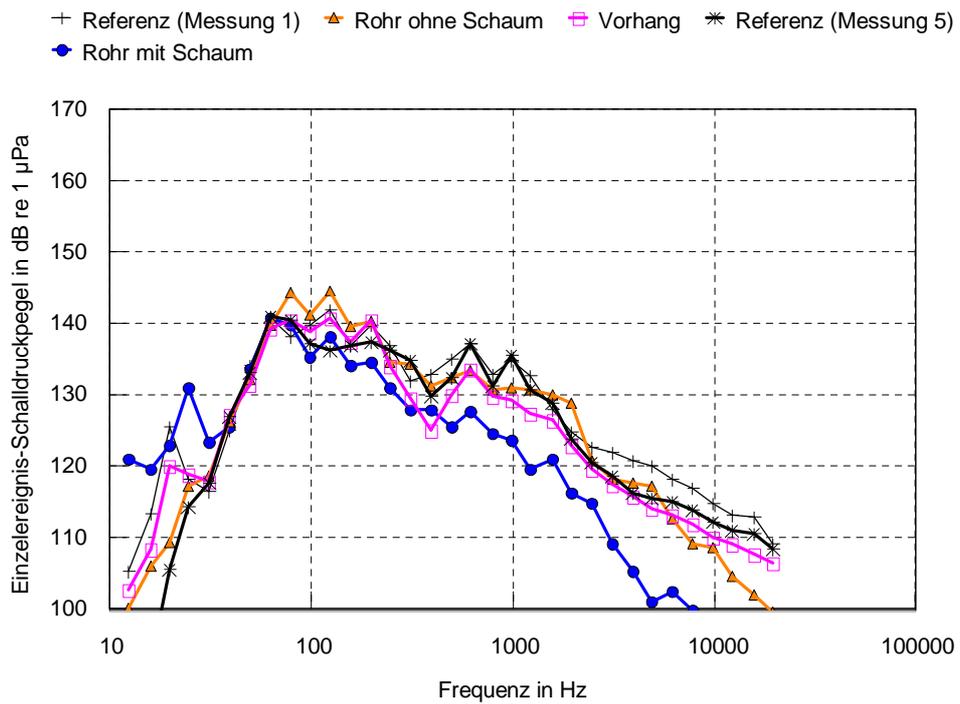
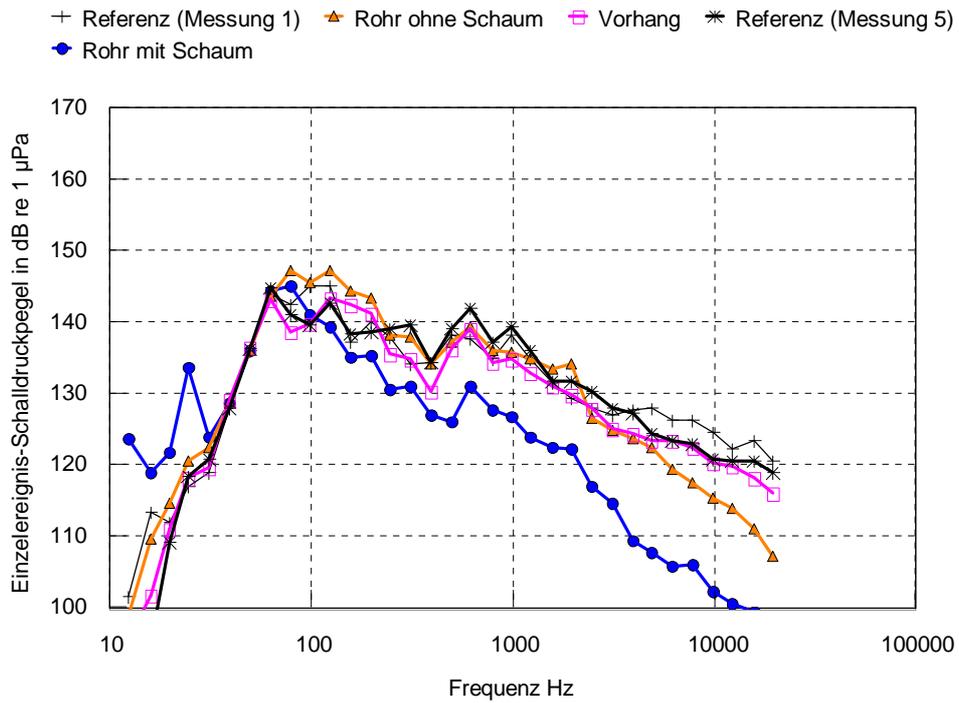


Bild 5.5a. Einzelereignispegel für alle Konfigurationen; Messung vom Schiff aus

Schiff -- 100 kJ



Schiff -- 196 kJ

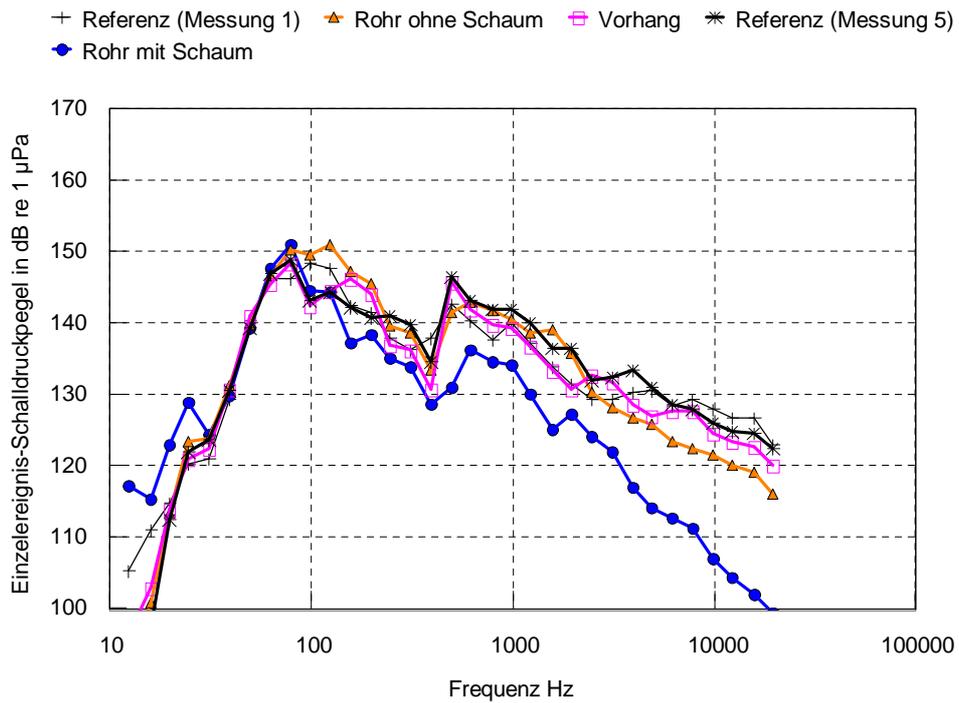


Bild 5.5b. Einzelereignispegel für alle Konfigurationen; Messung vom Schiff aus

## 5.2 Einfluss der Schlagenergie auf die Schallabstrahlung

Dieser Teilaspekt hat zwar nur mittelbar mit Schallschutzmaßnahmen beim Rammen zu tun, jedoch existieren bislang kaum Angaben zum Einfluss der Rammenergie auf die Schallabstrahlung unter Wasser. Solche Daten sind aber wünschenswert, um beispielsweise den Anstieg des Schallpegels beim Einsatz größerer Rammern prognostizieren zu können.

Für den Summenpegel ergibt sich ein Pegelanstieg  $\Delta L \approx 12 \log_{10} (E_2/E_1)$  dB bei Erhöhung der Schlagenergie von  $E_1$  auf  $E_2$ , siehe Bild 5.6. Der Zusammenhang zwischen Pegel und Energie ist jedoch frequenzabhängig. Geht man wieder von einem Pegelanstieg von  $\Delta L = k \log_{10} (E_2/E_1)$  dB aus, so beträgt der Faktor  $k$  etwa 10...12 bei niedrigen Frequenzen, steigt aber zwischen 1.5 kHz und 3 kHz rasch auf 25...28 an, wie Bild 5.7 zeigt.

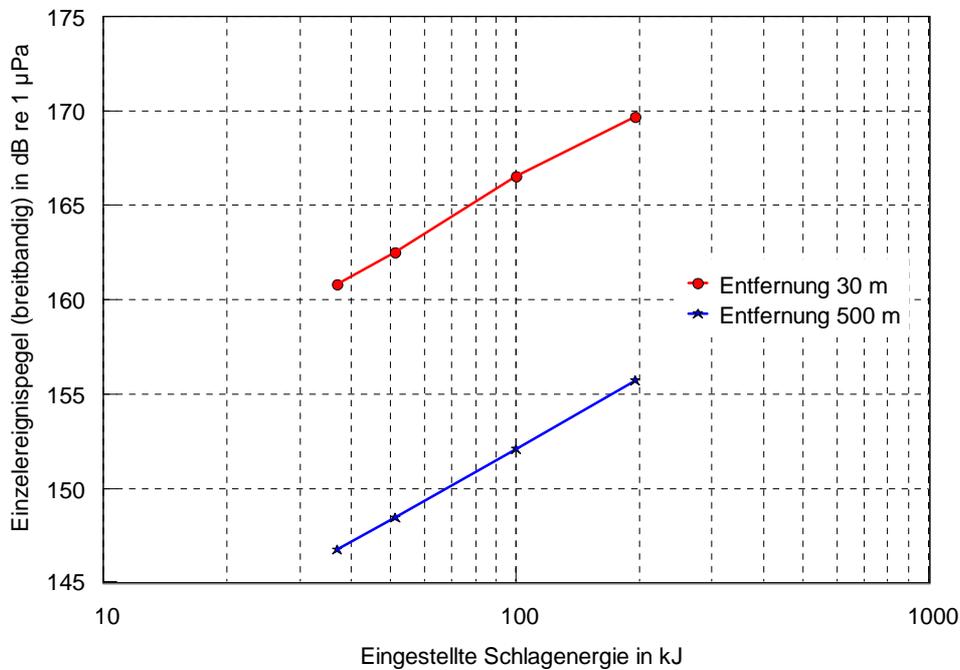


Bild 5.6. Einzelereignispegel (Summenpegel) als Funktion der Schlagenergie

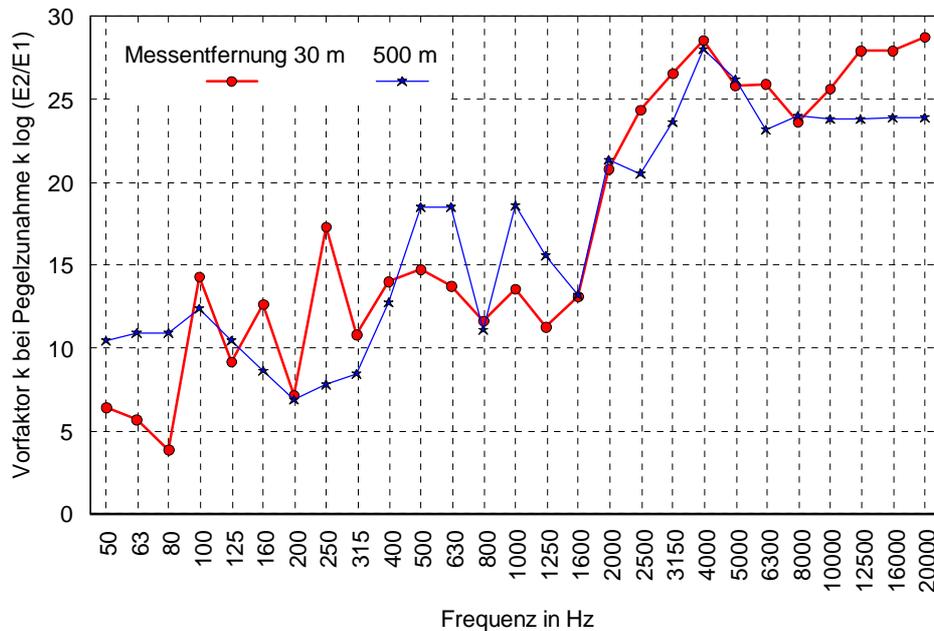


Bild 5.7. Frequenzabhängiger Faktor  $k$  bei Pegelanstieg  $\Delta L = k \log(E_2/E_1)$  dB bei Zunahme der Schlagenergie von  $E_1$  auf  $E_2$ .

### 5.3 Schallschutzrohr mit Schaumbeschichtung

In den Bildern 5.4 und 5.5 ist bereits zu erkennen, dass mit dem beschichteten Rohr die niedrigsten Pegel gemessen wurden. In Bild 5.8 sind die Differenzen zwischen diesen Messungen und den zugehörigen Referenzmessungen (Pfahl ohne Schallschutzrohr) aufgetragen, dazu der Medianwert der drei Messreihen. Eine signifikante Wirkung ist bei Frequenzen ab etwa 200 Hz vorhanden, die mit steigender Frequenz zunimmt; ab 10 kHz überschreitet das Schalldämmmaß 20 dB.

### 5.4 Rohr ohne Beschichtung

Nach Entfernen der Schaumschicht zeigte das Stahlrohr mit 12 mm Wandstärke ein erheblich geringeres Schalldämmmaß (Bild 5.9), das sich gut mit den theoretischen Erwartungen deckt. Eine merkliche Wirkung wurde erst bei Frequenzen oberhalb von etwa 3 kHz erzielt. Dies belegt die prinzipielle Richtigkeit des Konzeptes der lufthaltigen Beschichtung.

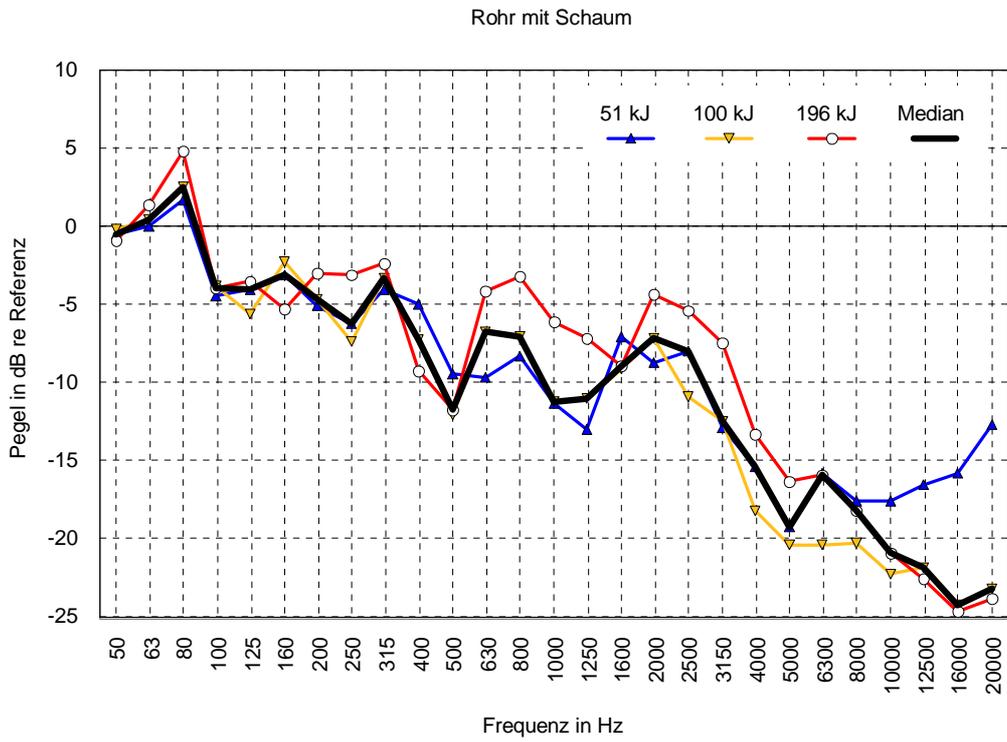


Bild 5.8. Gemessene Schalldämmung des beschichteten Stahlrohres

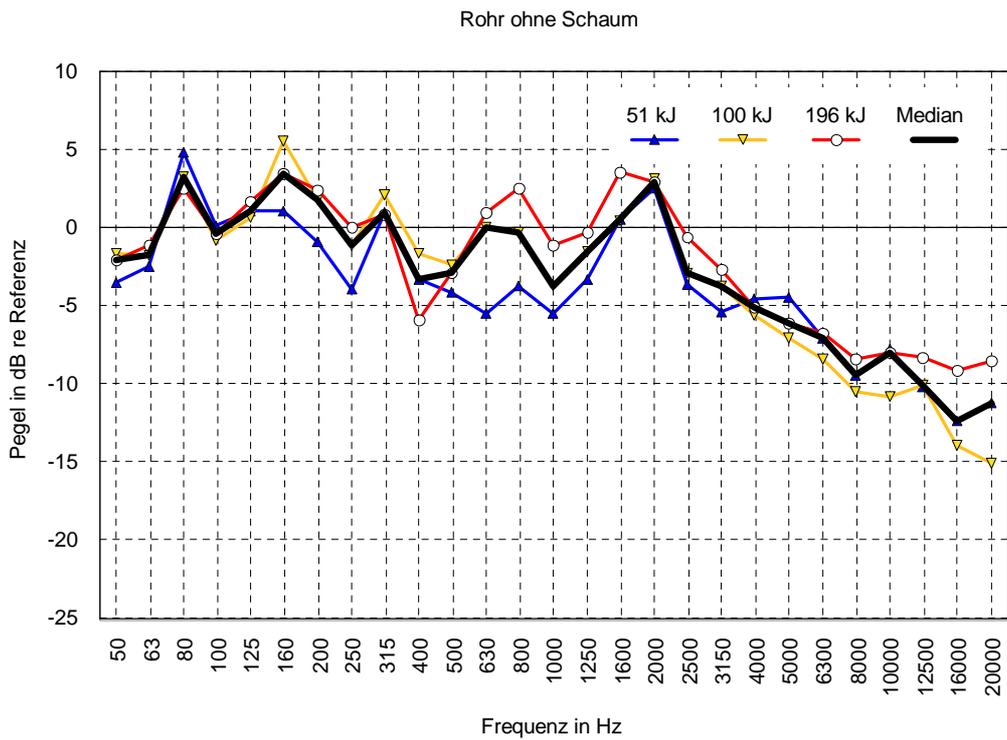


Bild 5.9. Gemessene Schalldämmung des Stahlrohres ohne Beschichtung

## 5.5 Schallschutzvorhang

Mit dem Vorhang aus 5 mm Gummi um den Rammpfahl konnte praktisch keine schalldämmende Wirkung erzielt werden (Bild 5.10).

In Bild 5.11 sind die gemessenen Medianwerte für alle drei Konfigurationen zusammengestellt.

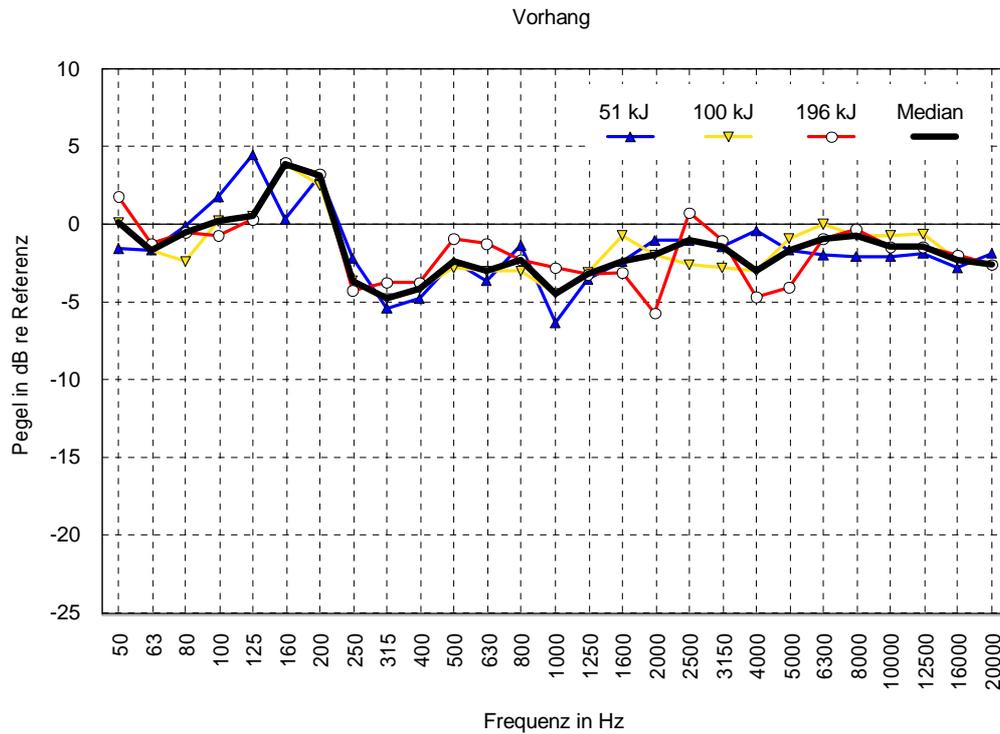


Bild 5.10. Gemessene Schalldämmung des Gummivorhangs

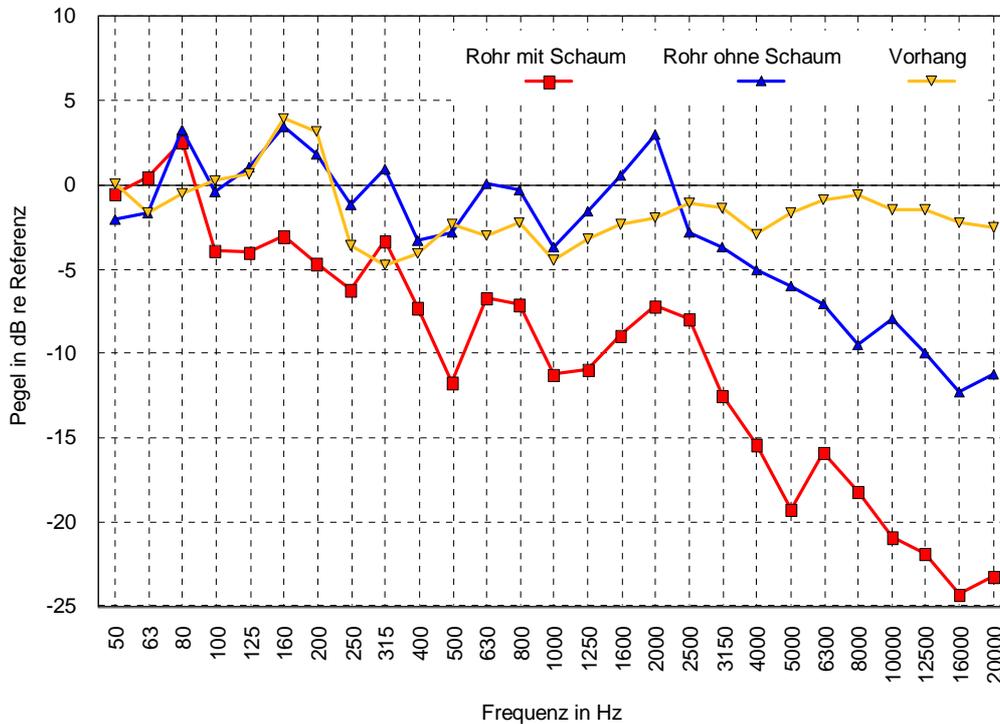


Bild 5.11. Medianwerte aus Bild 5.8 bis 5.10

## 5.6 Beurteilung der Ergebnisse aus biologischer Sicht

Die Ergebnisse der Messungen zeigen eine Reduzierung der Schallemissionen insbesondere durch das mit Schaum beschichtete Rohr, die vor allem im Frequenzbereich oberhalb von 500 Hz wirksam wird. Innerhalb des gemessenen Bereichs wurde oberhalb von 10 kHz die stärkste Dämmung mit über 20 dB erreicht. Der Bereich der stärksten Dämmung liegt damit deutlich oberhalb des Frequenzbereichs mit den stärksten Schallemissionen der hier durchgeführten Testrammung. Die Dämmung wird aber in den höheren Frequenzen stärker und wirkt damit vornehmlich in dem Bereich in dem die Meeressäuger die größte Hörempfindlichkeit aufweisen.

Eine Reduzierung der Schallpegel um 20 bis 25 dB in dem für die Meeressäuger wichtigen Frequenzspektrum ist aus biologischer Sicht als bedeutend zu bewerten und kann vermutlich die Auswirkungen von Lärmemissionen bei Rammarbeiten vermindern. Bei den Rammarbeiten für die Forschungsplattform FINO 1 wurden in 400 m Entfernung noch Spitzenpegel von 190 dB und Mittelungspegel (Schallereignispegel  $L_E$ ) von 165 dB erreicht [CRI, DEWI, ITAP 2004]. Die Werte deuten an, dass die von UBA bzw. vom BSH gewünschten Werte überschritten werden. Die Anwendung der hier erprobten Schallminderungsmaßnahme würde die Pegel deutlich senken, jedoch wäre die Dämmung in den niederen Frequenzen mit den höchsten Emissionen geringer als in den hohen Frequenzen. Zur Vermeidung einer

direkten Schädigung von Schweinswalen, die auch bei Offshore-Rammungen mit stärkeren Energien nur im Nahbereich um die Arbeiten zu befürchten wäre, kann bereits eine Reduzierung um 5 bis 10 dB zu einer Verkleinerung des Gefahrenbereichs beitragen. Unter der Annahme, dass eine Schädigung von Schweinswalen - und als solche kann eine temporäre Verschiebung der Hörschwelle angesehen werden – von der Frequenz der Schallemission und dem Hörvermögen abhängt, kann die in diesem Vorhaben erprobte Schallminderungsmaßnahme zur Schadensvermeidung beitragen.

In Bild 5.12 wird die Schallemission beim Bau der Messplattform Amrumbank West und die ermittelte frequenzabhängige Dämmung durch den Einsatz eines beschichteten Rohrs der Hörschwelle und der TTS-Schwelle von Schweinswalen gegenüber gestellt. Als TTS-Schwelle wurden folgend Richardson et al. [1995] zur Hörschwelle 80 dB addiert (s.o.). Der Verlauf der Kurven zeigt, dass bei der ungedämmten Rammung in 400 m Entfernung von der Schallquelle oberhalb einer Frequenz von 2000 Hz die TTS-Schwelle überschritten wurde, so dass eine Schädigung möglich war. Bei 20 kHz wird die TTS-Schwelle um fast 20 dB überschritten. Wie die Abbildung zeigt, könnte der Einsatz der hier erprobten Schallminderungsmaßnahme die Schallemission gerade in dem Bereich reduzieren, in dem eine Schädigung zu befürchten wäre.

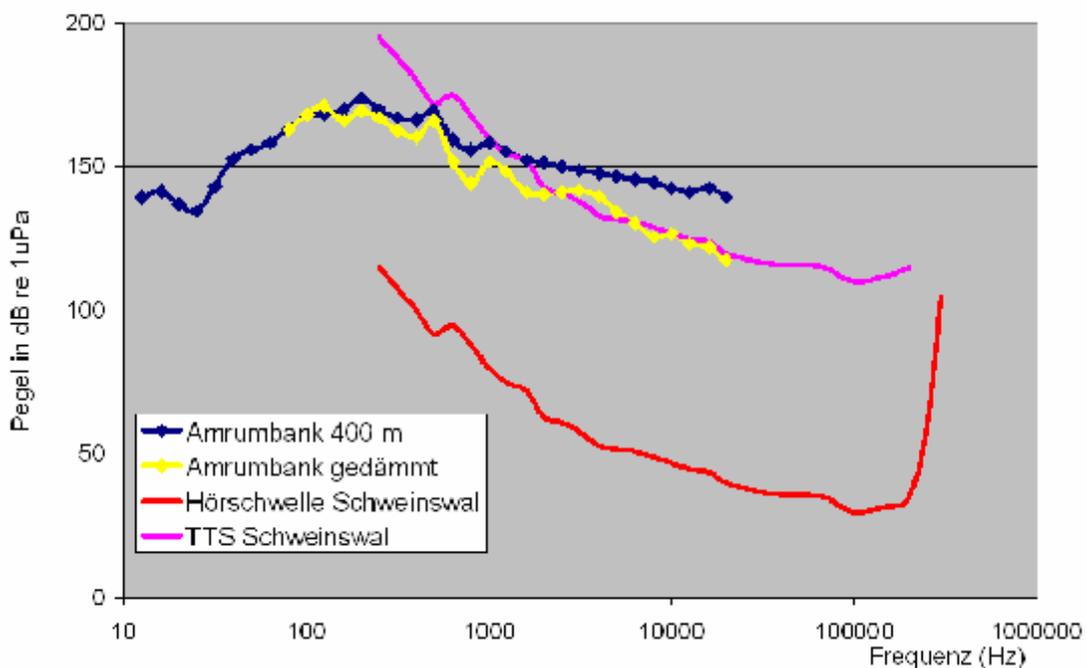


Bild 5.12: Reduzierung der Schallemissionen in Bezug zum Hörvermögen der Schweinswale. Dargestellt sind das beim Rammen der Plattform Amrumbank West gemessene Schallspektrum (blaue Kurve;  $L_E$ -Werte aus Bild 2.5) und die errechneten verminderten Pegel mit Schallschutzrohr (gelb) im Vergleich zur TTS-Schwelle und zur Hörschwelle des Schweinswals (unterer Hörbereich nach verschiedenen Messungen, siehe Text).

Bezüglich der Reaktion von Schweinswalen ist von Belang, dass die stärkste Dämmung in den Bereich mit der größten Hörempfindlichkeit fällt. Es ist daher zu erwarten, dass der Bereich, in dem Schweinswale die Rammgeräusche als störend wahrnehmen und darauf reagieren können, durch die Anwendung der Schallminderungsmaßnahmen reduziert wird. Über die Ausdehnung von Bereichen, in denen eine Störreaktion zu erwarten ist und wie die sich durch Schallminderungsmaßnahmen verkleinern lassen, sind derzeit keine definitiven Angaben möglich, da zu wenige Erkenntnisse über die Reaktion von Schweinswalen auf Rammgeräusche vorliegen.

Die Wirkung der hier erprobten Schallminderungsmaßnahme ist in den unteren Frequenzbereichen nur gering, so dass Fische mit relativ tieffrequentem Hörvermögen davon vermutlich deutlich weniger profitieren als Meeressäuger, da die Dämmung im Bereich unterhalb 500 Hz relativ gering ist. Da in diesem Frequenzbereich zugleich die stärkste Schallemission erfolgt ist noch unklar, ob eine erhöhte Sterblichkeit von Fischen im Nahbereich von Offshore-Rammarbeiten mit den hier erprobten Maßnahmen vermieden werden kann.

## 5.7 Erfahrungen mit der Handhabung der Schallschutzsysteme

Ein etwas kritischer Faktor bei den Versuchen war die Kranausrüstung des Pontons. Um Schallschutzrohr und Schallschutzvorhang sauber über positionieren können, waren relativ lange Trageseile und -ketten erforderlich. Weil gleichzeitig etwa 12 m Höhe (Rammpfahl + Follower) überwunden werden musste, war die maximale Höhe des Krans von 30 m gerade eben ausreichend. Da es keine Möglichkeit gab, gleichzeitig mit der Hauptlast einen Mannkorb einzusetzen, mussten die Seile auch aus diesem Grund ausreichend lang sein, um den Kranhaken nach Überstülpen des Rohres bzw. des Vorhangs vom Ponton aus lösen zu können.

Eine weitere Schwierigkeit ergab sich dadurch, dass die Versuche mit einem Stelzenponton durchgeführt wurden, der bei Seegang leicht schwankt. Bei großen Lasten wie der Ramme erfährt der Kran dadurch starke Lastwechsel, die ein präzises Positionieren erschweren oder sogar unmöglich machen, wenn z.B. die Kransensoren eine Überschreitung der maximal zulässigen Last signalisierten. Bei einer Hubinsel mit vier Beinen, wie sie auf Offshore-Baustellen üblicherweise eingesetzt wird, besteht dieses Problem aber nicht.

Das **Schallschutzrohr** war gut handhabbar. Die außen aufgebrachte Beschichtung war allerdings naturgemäß empfindlich und wurde bei der Verladung auf den Ponton leicht eingerissen. Allerdings war die Schadstelle oberhalb der Wasserlinie und deshalb ohne Bedeutung (in Bild 4.9 ist die mit Klebeband reparierte Stelle am linken Rand des Rohres zu erkennen). Für mehrfach verwendbare Schallschutzsysteme ist eine robustere Lösung erforderlich, z.B. mit einer Beschichtung auf der Innenseite des Rohres. Notwendig ist außerdem ein Schaummaterial mit einer besseren Standzeit im Wasser als die hier benutzte PE-Folie.

Das Gewicht des Rohres von ca. 8 Tonnen bereitete keine Probleme. Bei Schallschutzkonzepten für Monopiles mit z.B. 5 m Durchmesser könnten das Gewicht und auch der Preis sowie die Herstellungs- und Transportkosten für das Rohr ein kritischer Faktor sein, zumal es für die Wassertiefen in der Nordsee 25 m bis 30 m lang sein müsste. Statt eines Rohres als Träger für das eigentliche Schalldämmmaterial, wie es hier der Einfachheit halber benutzt wurde, erscheint eine fachwerkartige Konstruktion günstiger. Diese könnte zudem modular aufgebaut sein, also unterteilt in Segmente von 5 m bis 10 m Länge.

Der **Schallschutzvorhang** aus Gummi erwies sich zwar als ungeeignet zur Minderung des Unterwasserschalls. Sofern sich jedoch Blasenschleier als brauchbarer Unterwasser-Schallschutz erweisen sollten (dies wird gegenwärtig in einem FuE-Vorhaben des BMU untersucht [ISD, DEWI, ITAP 2006]), würden ähnliche schlauchartige Anordnungen benötigt, um die Blasen am Wegdriften infolge Strömung zu hindern. Denkbar sind anstelle eine schaumbeschichteten Rohres auch Anordnungen aus luftgefüllten Schläuchen oder Kammern, die in der Handhabung ähnlich sind.

Das Platzieren des Vorhangs mit dem Kran wurde durch die Windempfindlichkeit des relativ leichten Gebildes teilweise erschwert. Der Vorhang war so konstruiert, dass er sich bei richtiger Anbringung der Tragseile durch das eigene Gewicht zur Schlauchform öffnet. Beim ersten Versuch mit nicht optimal angebrachten Seilen erwies es sich als schwierig, den einmal durch Wind "zusammengeklappten" Vorhang wieder zu öffnen. Wegen der auf knapp 30 m begrenzten Arbeitshöhe des Krans war für die Installation des Vorhangs außerdem eine ausgeklügelte doppelte Seilführung erforderlich.

Ein weiteres Problem stellt mit Sicherheit die Tidenströmung in der Nordsee dar. Hierzu konnten keine Erfahrungen gesammelt werden; die sehr geringe Strömung am Messort in der Ostsee bereitete keine Schwierigkeiten. Bedacht werden sollte auch eine Transportvorrichtung, z.B. eine Transportwanne. Der einmal abgelegte Vorhang lässt sich sonst nur mühsam umladen.

## 6. Literatur

W. Au, P. E. Nachtigall & J. L. Pawloski (1999): Temporary threshold shift in hearing induced by an octave band of continuous noise in the bottlenose dolphin. *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 2251.

K. Betke, M. Schultz-von Glahn, R. Matuschek (2004): Underwater noise emissions from offshore wind turbines. In: Proceedings of the joint congress CFA/DAGA'04, 591-592, Strasbourg 2004

K. Betke, M. Schultz-von Glahn (2006): Minderung von Unterwasserschall bei Offshore-Rammarbeiten. In: Fortschritte der Akustik – DAGA'06, 439-440. Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA)

K. Betke, K.-H. Elmer, J. Gabriel, W.-J. Gerasch, R. Matuschek, T. Neumann (2005): Underwater noise emissions of offshore wind turbines. WTN – First International Meeting on Wind Turbine Noise. Berlin, 17th and 18th October 2005

D. Kastak, R. J. Schusterman, B. L. Southall & C. J. Reichmuth (1999): Underwater temporary threshold shift induced by an octave-band noise in three species of pinniped. *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 1142-1148.

J. Carstensen, O. D. Henriksen & J. Teilmann (2006): Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises: acoustic monitoring of echolocation activity using porpoise detectors (T-PODs). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **321**, 295-308.

CRI, DEWI, ITAP (2004): Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen. Abschlussbericht zum BMU-Projekt (FKZ 0327528A). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin

M. C. Hastings, A. N. Popper (2005): Effect of sound on fish. Jones & Stokes, Sacramento.

H. Henn, G.R. Sinambari, M. Fallen (1999): Ingenieurakustik, 2. Auflage. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden

Illingworth & Rodkin, Inc. (2001): San Francisco – Oakland Bay Bridge Pile Installation Demonstration Project (PIDP). Marine Mammal Impact Assessment. Appendix D.

ISD, DEWI, ITAP (2006): Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen. Abschlussbericht zum BMU-Projekt "Schall II (FKZ 0327528A). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin (in Vorbereitung)

F. B. Jensen et al. (1994): Computational Ocean Acoustics. AIP Press, Woodbury, New York

R. A. Kastelein, P. Bunscoek, M. Hagedoorn, W. W. L. Au, D. de Haan (2002): Audiogram of a harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) measured with narrow-band frequency modulated signals. *J. Acoust. Soc. Am.* **112**: 334-344.

D. R. Ketten, J. Finneran (2004): Noise exposure criteria: „Injury (PTS) criteria“. In: R. Gentry: Presentation at the Second Plenary Meeting of the Advisory Committee on Acoustic Impacts on Marine Mammals. Arlington, Virginia, 28-30 April 2004.

E. Lotze (1996): Schallschutzkapseln. In: W. Schirmer (Hrsg.), Technischer Schallschutz. VDI-Verlag, Düsseldorf

K. Lucke (2003): In: Abschlussbericht zum Teilprojekt "Schalleinwirkungen von Offshore-Windenergieparks" des UBA-FuE-Vorhabens FKZ 200 97 106 "Vermeidung und Verminderung von Belastungen der Meeresumwelt durch Offshore-Windenergieanlagen im küstenfernen Bereich der Nord- und Ostsee". Umweltbundesamt, Berlin

H. H. Medwin, C. S. Clay (1998): Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, San Diego, CA

H. Medwin et al. (2005): Sounds in the Sea. Cambridge University Press, New York

W.J. Richardson, C. R. Greene Jr., C. I. Malme, D. H. Thomson (1995): Marine Mammals and Noise. San Diego, Academic Press. 576 pp.

Talisman Energy UK Ltd. (2006): Beatrice Wind Farm Demonstrator Project. Environmental Statement.  
[http://www.beatricewind.co.uk/environmental\\_statement.pdf](http://www.beatricewind.co.uk/environmental_statement.pdf)

F. Thomsen, K. Lüdemann, R. Kafemann, W. Piper (2006): Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. BIOLA, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd.

J. Tougaard, I Ebbesen, S Tougaard, T. Jensen, J. Teilmann (2003). Satellite tracking of Harbour Seals on Horns Reef. Use of the Horns Reef wind farm area and the North Sea. Report request. Commissioned by Tech-wise A/S. Fisheries and Maritime Museum, Esbjerg

UBA (2003): Position des Umweltbundesamtes zu Schallemissionen von Offshore-Windenergieanlagen während der Bau- und Betriebsphase. Umweltbundesamt, Berlin

M. Wahlberg, H. Westerberg (2005): Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **288**, 295-309.

B. Würsig et al. (2000): Development of an air bubble curtain to reduce underwater noise of percussive piling. *Marine Environmental research* **49**, 79-93

## **7. Zusammenfassung**

Es wurde ein Verfahren zur Minderung des Unterwasserschalls bei Offshore-Rammarbeiten im realitätsnahen Maßstab erprobt, und zwar wurde ein Schallschirm aus einem Material eingesetzt, dessen Schallkennimpedanz sich von der des Wassers stark unterscheidet. Die Messungen haben gezeigt, dass sich mit diesem Prinzip ein wirksamer Schallschutz realisieren lässt. Mit einem Schallschutzsystem bestehend aus einem Rohr mit einer etwa 2 cm starken Beschichtung aus lufthaltigem Schaummaterial konnten Rammgeräusche je nach Frequenz um 5 dB bis 25 dB reduziert werden. Bei 1 kHz wurden etwa 10 dB Schallminderung erzielt, bei 10 kHz etwa 20 dB. Es ist zu erwarten, dass mit größeren Schichtdicken eine noch stärkere Schalldämmung zu erreichen ist.

## Anhang: Diagramm Daten in Tabellen

Zu Bild 5.4a: Messung vom Ponton aus, Rammenergie 38 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	144.52	144.33	145.88	141.86	142.34
16	144.76	146.05	146.34	140.00	139.01
20	129.17	130.61	132.31	131.57	130.06
25	140.33	137.20	139.13	132.91	133.19
31.5	138.25	141.21	143.01	138.69	138.05
40	146.73	147.31	147.66	143.28	142.72
50	150.46	151.38	151.83	146.79	146.57
63	152.52	152.24	152.42	145.37	144.29
80	148.55	144.37	151.26	144.38	145.21
100	155.70	153.15	153.92	147.54	147.15
125	155.64	153.09	155.55	149.73	149.80
160	158.51	155.61	157.21	152.27	151.28
200	155.29	154.33	155.98	152.78	152.59
250	146.61	145.45	147.63	147.74	145.81
315	147.31	145.53	145.04	146.66	144.14
400	149.20	146.34	149.05	147.73	148.53
500	150.68	148.02	151.58	150.17	151.86
630	154.70	148.47	156.59	150.70	152.28
800	154.31	138.13	153.59	147.25	147.12
1000	145.32	134.16	145.91	139.37	142.29
1250	143.20	132.78	144.95	142.31	143.52
1600	141.33	131.45	140.97	140.86	143.09
2000	137.80	126.86	137.80	135.59	135.40
2500	136.02	127.62	137.06	129.65	131.78
3150	133.74	121.12	130.95	126.33	126.30
4000	133.17	117.66	125.36	121.94	121.23
5000	132.03	115.34	122.44	119.72	119.23
6300	132.64	115.37	120.34	117.69	117.24
8000	130.33	112.73	119.48	115.17	115.78
10000	125.89	111.89	115.65	112.58	113.90
12500	122.59	111.49	113.67	110.95	111.63
16000	120.98	112.37	113.81	110.60	111.42
20000	118.15	113.29	113.84	108.93	110.03

Zu Bild 5.4a (Fortsetzung): Messung vom Ponton aus, Rammenergie 51 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	145.35	147.66	148.49	143.53	142.46
16	144.46	144.73	145.03	138.42	139.01
20	132.69	134.38	133.76	132.02	131.49
25	137.73	135.63	137.01	131.61	131.77
31.5	139.04	142.14	143.22	139.01	138.78
40	146.43	146.45	146.87	143.30	142.78
50	152.51	153.02	152.68	147.56	147.10
63	153.24	152.75	152.81	145.55	144.64
80	149.89	146.17	152.18	145.20	145.41
100	157.32	154.68	155.50	147.48	147.47
125	157.48	154.79	156.63	151.37	152.16
160	161.17	157.45	159.17	154.53	154.36
200	157.91	156.16	157.85	155.06	154.75
250	150.87	148.77	150.15	151.29	150.42
315	151.77	149.62	148.14	149.16	148.33
400	152.23	154.69	151.21	150.68	151.09
500	152.56	150.21	151.63	150.58	149.70
630	157.71	151.11	155.61	152.61	152.55
800	155.09	143.47	154.89	151.61	151.09
1000	149.88	141.74	150.17	142.79	144.41
1250	147.37	140.26	148.88	145.52	145.87
1600	144.22	140.50	145.98	145.60	145.69
2000	144.73	138.14	145.13	138.87	139.20
2500	143.80	136.75	144.70	136.33	136.16
3150	139.94	131.38	139.52	133.87	133.43
4000	137.86	128.71	133.83	129.59	128.80
5000	136.97	126.08	131.33	129.12	128.68
6300	136.05	127.80	130.28	127.56	127.68
8000	134.58	123.45	128.11	126.21	126.37
10000	132.32	121.22	123.65	122.11	123.37
12500	129.60	118.30	120.82	120.30	121.42
16000	128.84	116.64	120.18	119.46	120.45
20000	126.18	115.16	118.23	116.06	117.79

Zu Bild 5.4b: Messung vom Ponton aus, Rammenergie 100 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	150.01	150.96	151.91	145.04	145.41
16	149.41	149.10	148.85	142.88	142.62
20	133.87	135.59	136.85	134.01	132.93
25	140.31	138.16	139.31	134.54	134.79
31.5	143.34	145.13	146.15	142.33	142.39
40	147.42	147.64	147.02	142.67	142.16
50	154.41	154.63	154.70	149.50	148.99
63	154.08	154.10	154.02	144.05	143.62
80	151.44	148.69	154.13	146.13	145.92
100	160.27	157.53	158.61	151.57	152.01
125	161.12	157.44	159.28	154.12	153.78
160	165.25	161.54	163.78	158.71	158.80
200	160.85	159.47	160.94	157.20	157.33
250	156.57	152.83	155.88	156.82	156.76
315	155.32	152.92	152.22	153.40	153.25
400	158.69	157.06	157.98	155.84	156.28
500	157.18	151.83	156.16	153.39	154.11
630	160.70	153.43	159.51	155.66	156.34
800	157.97	144.35	157.52	153.69	154.77
1000	155.43	145.81	154.76	149.07	150.29
1250	150.36	144.32	154.42	149.39	150.95
1600	147.12	142.98	151.92	150.67	150.40
2000	148.56	142.47	150.74	146.88	147.85
2500	149.95	142.76	150.60	143.56	142.77
3150	145.00	136.90	145.96	142.51	142.78
4000	143.28	133.45	140.47	137.84	138.93
5000	141.94	133.07	138.56	136.19	137.50
6300	141.39	133.71	137.05	134.54	135.17
8000	139.72	129.10	135.61	132.52	133.72
10000	138.05	127.62	131.69	131.18	131.83
12500	136.33	124.85	128.29	129.32	130.66
16000	135.34	122.87	127.78	129.03	129.70
20000	133.11	119.45	125.03	125.99	127.88

Zu Bild 5.4b (Fortsetzung): Messung vom Ponton aus, Rammenergie 196 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	153.68	152.21	151.75	145.36	145.27
16	148.68	149.82	150.65	144.60	144.91
20	137.93	136.45	137.71	133.87	135.20
25	145.90	142.63	143.18	138.11	138.09
31.5	146.17	146.23	147.24	144.07	143.98
40	148.86	148.48	148.86	144.59	144.42
50	157.51	157.55	157.47	150.77	150.89
63	155.69	156.20	156.08	147.63	147.98
80	156.42	152.61	156.79	148.28	147.66
100	163.77	159.08	161.06	155.53	155.84
125	165.48	159.88	162.15	158.21	157.53
160	168.23	164.45	166.78	161.52	161.77
200	161.72	159.59	161.75	158.57	158.95
250	160.70	156.73	160.14	160.19	160.55
315	156.54	154.98	154.69	154.09	154.67
400	161.27	158.29	160.46	158.67	159.30
500	163.69	157.96	162.41	156.11	158.36
630	165.45	158.53	166.06	159.55	160.58
800	162.78	153.00	162.84	156.74	157.89
1000	156.69	152.71	157.33	149.22	152.35
1250	154.31	148.33	157.75	150.64	152.47
1600	152.23	148.09	153.55	152.24	153.36
2000	152.69	147.26	152.35	149.86	151.39
2500	152.86	149.32	151.65	147.39	150.40
3150	147.30	143.70	147.17	145.64	148.97
4000	146.25	141.97	144.35	143.24	145.52
5000	145.40	137.96	141.65	142.25	143.77
6300	144.85	139.41	140.52	141.24	142.84
8000	142.99	134.97	137.92	139.64	140.18
10000	141.63	131.69	134.96	137.55	138.35
12500	140.45	129.13	132.63	135.89	137.77
16000	139.30	126.42	132.03	136.12	136.80
20000	137.07	123.15	129.66	133.79	134.63

Zu Bild 5.5a: Messung vom Schiff aus, Rammenergie 38 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	120.65	109.42	88.84	114.68	75.93
16	115.49	116.68	96.61	116.86	88.66
20	121.61	122.88	106.59	123.83	104.58
25	131.05	119.17	113.81	126.24	111.81
31.5	118.99	116.75	116.82	119.12	116.57
40	125.22	123.63	125.83	126.81	127.00
50	131.29	130.28	130.50	130.72	131.26
63	138.49	137.82	138.09	138.35	138.45
80	137.38	140.41	143.58	141.98	141.29
100	135.19	135.41	139.30	132.92	133.03
125	143.42	134.95	144.09	140.15	137.38
160	137.01	133.38	138.03	137.20	135.61
200	137.23	128.62	138.83	137.39	135.68
250	134.76	123.81	133.47	133.31	132.90
315	128.96	122.74	131.92	130.63	130.30
400	128.90	126.21	128.42	126.32	127.41
500	130.39	126.84	129.44	130.18	131.23
630	130.16	126.84	132.44	133.82	133.15
800	129.42	121.71	130.19	128.60	127.41
1000	129.60	118.39	127.56	128.36	131.08
1250	127.57	111.08	125.65	124.84	126.66
1600	121.20	112.77	125.02	122.89	125.63
2000	117.12	105.57	121.51	119.40	116.89
2500	116.01	102.90	114.07	116.42	113.36
3150	116.76	96.91	110.73	114.83	109.22
4000	113.91	96.32	106.86	112.57	104.78
5000	113.31	94.83	106.47	109.77	104.76
6300	111.36	94.89	103.62	107.97	102.78
8000	110.30	94.69	100.42	106.06	101.03
10000	107.30	94.50	99.27	104.43	99.66
12500	103.11	95.10	96.92	102.31	98.39
16000	101.22	96.41	96.99	101.35	98.06
20000	99.17	96.21	96.15	98.86	97.18

Zu Bild 5.5a (Fortsetzung): Messung vom Schiff aus, Rammenergie 51 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	105.28	121.12	99.80	102.78	79.74
16	113.38	119.73	106.01	108.40	92.21
20	125.53	122.89	109.51	120.20	105.67
25	118.21	131.09	117.26	119.01	114.34
31.5	116.49	123.54	118.72	117.86	117.78
40	125.01	125.71	126.42	127.26	127.11
50	134.17	133.72	132.21	131.63	133.18
63	140.82	140.91	139.83	139.49	141.12
80	138.10	139.82	144.40	140.50	140.52
100	139.77	135.32	141.40	138.99	137.15
125	142.13	138.13	144.73	140.86	136.29
160	137.07	134.05	139.63	137.49	137.13
200	139.79	134.69	140.40	140.59	137.38
250	137.12	130.95	134.69	134.23	136.35
315	132.00	128.01	134.50	129.59	134.93
400	133.04	128.07	131.25	125.03	129.79
500	135.07	125.63	132.47	130.12	132.42
630	137.33	127.69	133.38	133.68	137.30
800	133.06	124.73	130.88	129.90	131.19
1000	134.90	123.60	130.97	129.31	135.60
1250	132.64	119.72	130.83	127.42	130.92
1600	128.02	120.97	130.12	126.57	128.87
2000	124.91	116.22	128.96	123.02	124.03
2500	122.76	114.79	120.72	119.58	120.61
3150	122.01	109.19	118.18	117.42	118.80
4000	120.76	105.36	117.78	115.83	116.22
5000	120.22	101.01	117.33	114.09	115.69
6300	118.30	102.51	112.76	113.15	115.06
8000	117.11	99.61	109.17	111.99	113.97
10000	114.87	97.34	108.60	110.12	112.15
12500	113.14	96.62	104.53	109.16	111.01
16000	112.89	97.08	102.07	107.80	110.57
20000	109.11	96.43	99.42	106.56	108.39

Zu Bild 5.5b: Messung vom Schiff aus, Rammenergie 100 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	101.61	123.78	98.69	95.27	85.69
16	113.38	118.98	109.53	101.85	94.89
20	111.93	121.69	114.64	110.98	109.23
25	116.94	133.62	120.63	118.29	118.49
31.5	118.89	123.89	122.55	119.75	120.94
40	127.93	128.81	128.85	129.10	128.06
50	136.10	135.99	136.00	136.52	136.39
63	143.98	144.47	143.80	143.26	144.91
80	142.59	145.17	147.35	138.67	140.98
100	145.00	141.17	145.68	139.94	139.64
125	145.01	139.47	147.24	143.40	142.77
160	137.25	135.04	144.37	142.47	138.54
200	140.03	135.36	143.36	141.23	138.70
250	137.96	130.59	138.32	135.63	139.24
315	134.26	131.00	137.95	134.85	139.58
400	134.36	127.09	134.22	130.31	134.41
500	138.16	126.11	137.31	136.33	139.08
630	137.76	131.06	139.36	139.15	142.13
800	134.76	127.70	135.96	134.30	137.23
1000	138.10	126.87	135.92	134.99	139.39
1250	134.84	123.91	134.81	132.93	136.03
1600	131.53	122.47	133.55	131.09	131.81
2000	129.46	122.35	134.09	129.79	131.76
2500	127.95	117.10	126.60	127.86	130.37
3150	127.13	114.65	124.97	125.21	127.94
4000	127.73	109.51	123.65	124.42	127.34
5000	127.97	107.65	122.49	123.53	124.46
6300	126.26	105.88	119.43	123.52	123.43
8000	126.41	106.12	117.40	122.44	123.06
10000	124.59	102.38	115.33	120.30	120.92
12500	122.33	100.51	113.83	119.92	120.50
16000	123.39	99.16	111.00	118.29	120.52
20000	120.69	97.50	107.16	116.18	118.84

Zu Bild 5.5b (Fortsetzung): Messung vom Schiff aus, Rammenergie 196 kJ

Frequenz in Hz	Einzelereignis-Schalldruckpegel in dB re 1 µPa				
	Referenz- messung 1 (Messung 1)	Rohr mit Schaum	Rohr ohne Schaum	Vorhang	Referenz- messung 2 (Messung 5)
12.5	105.42	117.34	92.05	96.03	87.34
16	111.15	115.41	100.77	103.05	97.36
20	114.91	123.01	113.57	114.01	112.53
25	120.30	128.85	123.35	121.05	122.05
31.5	121.06	124.45	124.03	122.57	123.70
40	129.33	129.92	131.38	130.76	130.62
50	140.34	139.49	139.83	141.07	139.29
63	146.33	147.76	146.79	145.69	146.94
80	146.24	151.05	150.28	148.52	149.02
100	148.47	144.55	149.58	142.55	143.26
125	147.83	144.31	151.03	144.71	144.39
160	142.43	137.20	147.38	146.25	142.20
200	141.51	138.50	145.49	144.18	140.91
250	138.07	135.00	139.62	136.94	141.18
315	136.27	133.90	138.61	136.21	139.87
400	137.95	128.78	133.53	130.83	134.54
500	142.85	131.16	141.54	145.81	146.66
630	140.36	136.24	142.87	142.10	143.26
800	137.76	134.56	141.82	139.88	142.10
1000	140.17	134.05	140.53	139.30	142.07
1250	137.33	130.20	138.60	136.82	140.05
1600	134.02	125.13	139.12	133.51	136.63
2000	131.48	127.15	135.93	130.87	136.53
2500	129.41	124.09	130.37	132.69	131.91
3150	129.45	122.02	128.31	131.67	132.62
4000	130.39	117.14	126.87	128.73	133.39
5000	130.48	114.17	125.94	127.03	131.01
6300	128.56	112.66	123.37	127.71	128.62
8000	129.42	111.24	122.54	127.76	128.02
10000	127.94	107.08	121.49	124.67	126.10
12500	126.80	104.30	120.03	123.52	124.95
16000	126.67	102.05	119.09	122.64	124.57
20000	122.96	99.13	115.99	120.05	122.59

Zu Bild 5.6

	Einzelereignis-Schalldruckpegel (Summenpegel) in dB re 1 $\mu$ Pa			
bei Rammenergie in kJ	38	51	100	196
Messentfernung 30 m	160.78	162.53	166.52	169.70
Messentfernung 500 m	146.88	148.78	152.52	156.29

Zu Bild 5.7

Frequenz in Hz	Frequenzabhängiger Faktor k bei Pegelanstieg $\Delta L = k \log (E_2/E_1)$ dB bei Zunahme der Schlagenergie von $E_1$ auf $E_2$	
	Entfernung 30 m	Entfernung 500 m
50	6.5	10.9
63	5.7	11.4
80	3.8	11.4
100	14.3	12.8
125	9.2	10.9
160	12.7	9.1
200	7.2	7.4
250	17.3	8.3
315	10.8	8.9
400	14.0	13.2
500	14.8	19.0
630	13.7	19.0
800	11.6	11.6
1000	13.6	19.1
1250	11.3	16.1
1600	13.1	13.7
2000	20.8	21.8
2500	24.4	21.0
3150	26.6	24.1
4000	28.6	28.5
5000	25.8	26.7
6300	25.9	23.7
8000	23.6	24.5
10000	25.6	24.3
12500	28.0	24.3
16000	28.0	24.4
20000	28.8	24.4

Zu Bild 5.8: Gemessene Schalldämmung des beschichteten Stahlrohres

Frequenz in Hz	Pegel in dB re Referenz			
	Rammenergie 51 kJ	Rammenergie 100 kJ	Rammenergie 196 kJ	Median
50	-0.45	-0.12	-0.85	-0.45
63	0.09	0.48	1.43	0.48
80	1.72	2.57	4.81	2.57
100	-4.45	-3.84	-3.92	-3.92
125	-4.00	-5.55	-3.52	-4.00
160	-3.02	-2.22	-5.23	-3.02
200	-5.10	-4.68	-3.01	-4.68
250	-6.17	-7.38	-3.07	-6.17
315	-3.99	-3.27	-2.37	-3.27
400	-4.97	-7.28	-9.17	-7.28
500	-9.44	-12.06	-11.69	-11.69
630	-9.64	-6.71	-4.12	-6.71
800	-8.33	-7.07	-3.20	-7.07
1000	-11.30	-11.24	-6.12	-11.24
1250	-12.92	-10.94	-7.13	-10.94
1600	-7.05	-9.07	-8.89	-8.89
2000	-8.69	-7.12	-4.33	-7.12
2500	-7.97	-10.86	-5.32	-7.97
3150	-12.82	-12.49	-7.43	-12.49
4000	-15.40	-18.23	-13.25	-15.40
5000	-19.21	-20.33	-16.31	-19.21
6300	-15.79	-20.39	-15.90	-15.90
8000	-17.50	-20.30	-18.18	-18.18
10000	-17.53	-22.22	-20.86	-20.86
12500	-16.52	-21.83	-22.50	-21.83
16000	-15.81	-24.24	-24.62	-24.24
20000	-12.68	-23.20	-23.83	-23.20

Zu Bild 5.9: Gemessene Schalldämmung des unbeschichteten Stahlrohres

Frequenz in Hz	Pegel in dB re Referenz			
	Rammenergie 51 kJ	Rammenergie 100 kJ	Rammenergie 196 kJ	Median
50	-3.46	-1.60	-2.01	-2.01
63	-2.49	-1.68	-1.04	-1.68
80	4.80	3.26	2.54	3.26
100	0.13	-0.82	-0.39	-0.39
125	1.10	0.73	1.70	1.10
160	1.06	5.62	3.45	3.45
200	-0.89	1.83	2.48	1.83
250	-3.93	-1.14	0.05	-1.14
315	1.00	2.19	0.84	1.00
400	-3.29	-1.64	-5.92	-3.29
500	-4.10	-2.35	-2.81	-2.81
630	-5.45	0.10	1.01	0.10
800	-3.68	-0.30	2.56	-0.30
1000	-5.43	-3.68	-1.14	-3.68
1250	-3.31	-1.53	-0.23	-1.53
1600	0.60	0.52	3.60	0.60
2000	2.55	3.13	2.95	2.95
2500	-3.54	-2.85	-0.54	-2.85
3150	-5.33	-3.66	-2.64	-3.66
4000	-4.48	-5.58	-5.02	-5.02
5000	-4.39	-6.98	-6.04	-6.04
6300	-7.04	-8.33	-6.69	-7.04
8000	-9.44	-10.51	-8.38	-9.44
10000	-7.77	-10.76	-7.95	-7.95
12500	-10.11	-10.00	-8.27	-10.00
16000	-12.32	-13.89	-9.08	-12.32
20000	-11.19	-15.03	-8.47	-11.19

Zu Bild 5.10: Gemessene Schalldämmung des Gummivorhangs

Frequenz in Hz	Pegel in dB re Referenz			
	Rammenergie 51 kJ	Rammenergie 100 kJ	Rammenergie 196 kJ	Median
50	-1.55	0.12	1.78	0.12
63	-1.63	-1.66	-1.25	-1.63
80	-0.02	-2.32	-0.50	-0.50
100	1.84	0.29	-0.71	0.29
125	4.57	0.62	0.32	0.62
160	0.36	3.92	4.05	3.92
200	3.21	2.52	3.27	3.21
250	-2.12	-3.62	-4.24	-3.62
315	-5.34	-4.74	-3.66	-4.74
400	-4.76	-4.11	-3.71	-4.11
500	-2.30	-2.76	-0.85	-2.30
630	-3.62	-2.99	-1.16	-2.99
800	-1.29	-2.94	-2.22	-2.22
1000	-6.29	-4.41	-2.77	-4.41
1250	-3.50	-3.11	-3.23	-3.23
1600	-2.30	-0.73	-3.12	-2.30
2000	-1.01	-1.98	-5.66	-1.98
2500	-1.03	-2.52	0.78	-1.03
3150	-1.38	-2.74	-0.95	-1.38
4000	-0.39	-2.93	-4.66	-2.93
5000	-1.60	-0.94	-3.98	-1.60
6300	-1.91	0.08	-0.91	-0.91
8000	-1.98	-0.63	-0.26	-0.63
10000	-2.03	-0.63	-1.43	-1.43
12500	-1.85	-0.59	-1.43	-1.43
16000	-2.77	-2.24	-1.93	-2.24
20000	-1.83	-2.67	-2.54	-2.54