

TEXTE

102/2024

Lärmkartierung deutscher Meeresgebiete – Erstellung von interaktiven Lärmkarten für Nord- und Ostsee als Bewertungsgrundlage zur Umsetzung der EU Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL)

TEXTE 102/2024

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 25 205
FB000977

Lärmkartierung deutscher Meeresgebiete – Erstellung von interaktiven Lärmkarten für Nord- und Ostsee als Bewertungsgrundlage zur Umsetzung der EU Meeresstrategie- Rahmenrichtlinie (MSRL)

von

Dr. Dietrich Wittekind
DW-ShipConsult GmbH, Schwentinental

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

DW-ShipConsult GmbH
Lise-Meitner-Str. 9
24223 Schwentinental

Abschlussdatum:

August 2014

Redaktion:

Fachgebiet II 2.3 Schutz der Meere und Polargebiete
Stefanie Werner

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den
Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Lärmkartierung deutscher Meeresgebiete - Erstellung von interaktiven Lärmkarten für Nord- und Ostsee als Bewertungsgrundlage zur Umsetzung der EU Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL)“ des Umweltbundesamts (FKZ 371025205) wurde die Software SEANAT (Subsea Environmental Acoustic Noise Assessment Tool) für die Modellierung von Schallkarten entwickelt. Zum Überprüfen der modellierten Ergebnisse und als Beitrag für eine Anfangsbewertung des Umweltzustandes wurden zusätzlich Messdaten in der Nord- und Ostsee aufgezeichnet und ausgewertet. Sowohl die Software zur Erstellung der Schallkarten, als auch die Messungen können Verwendung im Rahmen der Maßnahme „Lärmkartierung deutscher Meeresgebiete“ finden, die neben anderen als eine Maßnahme zum Erreichen des MSRL-Umweltziels „Meere ohne Beeinträchtigung durch anthropogenen Energieeintrag“ definiert wurde.

Abstract

Within the framework of the research and development project "Noise Mapping of German Marine Areas - Production of Interactive Noise Maps for the North Sea and the Baltic Sea as an Assessment Basis for the Implementation of the EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD)" of the German Environment Agency (FKZ 371025205), the software SEANAT (Subsea Environmental Acoustic Noise Assessment Tool) was developed for the modeling of noise maps. In order to verify the modelled results and to contribute to an initial assessment of the environmental status, additional measurement data in the North Sea and the Baltic Sea were recorded and evaluated. Both the software for the creation of sound maps as well as the measurements can be used in the context of the measure "Noise Mapping of German Marine Areas", which was defined as one among other measures to achieve the MSFD environmental goal "Seas free from anthropogenic energy input".

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abkürzungsverzeichnis | 7 |
| Zusammenfassung | 8 |
| Summary | 9 |
| 1 Einführung | 10 |
| 2 Ziele des Vorhabens | 11 |
| 2.1 Umwelt-Rahmenbedingungen | 11 |
| 2.2 Technische Umsetzung eines Werkzeuges zur Abschätzung biologischer Wirkung | 11 |
| 3 Arbeitspaket 1: Schallmessungen in der Deutschen AWZ | 12 |
| 3.1 Positionen der Rekorder | 12 |
| 3.2 Messgerät | 12 |
| 3.3 Rekorder in der Ostsee | 13 |
| 3.4 Rekorder in der Nordsee | 13 |
| 3.5 Auswertung | 13 |
| 3.5.1 Auswertung Ostsee | 14 |
| 3.5.2 Auswertung Nordsee | 15 |
| 4 Arbeitspaket 2: Prüfung existenter Vermessungsstandards | 16 |
| 4.1 Standards zur Vermessung von Schiffen | 16 |
| 4.2 Standards in der ökologischen Begleitforschung | 17 |
| 5 Quellpegelvorgaben für die Software (Schallprofile) | 18 |
| 5.1 Schiffe | 18 |
| 5.2 Rammen | 18 |
| 5.3 Bagger | 19 |
| 5.4 Seismik | 19 |
| 5.5 Explosionen | 19 |
| 5.6 Militärisches Sonar | 20 |
| 5.7 Natürliche Geräusche | 20 |
| 6 Umweltparameter | 20 |
| 6.1 Arbeitspaket 3: Untersuchung der spezifischen Schallausbreitung | 21 |
| 6.2 Bereitstellung weiterer Datensätze | 22 |
| 7 Entwicklungsstand der Software | 23 |
| 7.1 Konzept zur Berechnung der Schallausbreitung | 23 |
| 7.2 Biologische Bewertungskriterien | 23 |
| 7.3 Genauigkeit der durch SEANAT berechneten Schallpegel | 24 |
| 8 Empfehlungen für die Etablierung eines Langzeitmonitoring gemäß MSRL | 24 |
| 8.1 Möglichkeiten der Beschreibung des Umweltzustandes | 25 |
| 8.2 Erkenntnisse aus den bisherigen Untersuchungen vor dem Hintergrund der Umsetzung der MSRL | 25 |
| 8.3 Monitoring-Philosophie | 26 |
| 8.4 Mögliche Vorgehensweise für die Etablierung eines Monitorings | 27 |
| 9 Ausblick | 28 |
| Literatur | 29 |

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Statistik Kieler Bucht, Messposition vor Sperrgebiet Schönhagen, dargestellt für den gesamten Zeitraum der Messung **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
- Abbildung 2: Statistik der Schallmessung in der Deutschen Bucht an der Messposition 15 sm nördlich des Windparks Global Tech 1, dargestellt über den gesamten Zeitraum..... **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
- Abbildung 3: Literaturdaten zum Umweltgeräusch (spektrale Darstellung in 1 Hz Bandbreite) in der Ostsee (links) und Nordsee (rechts). Entnommen aus Wille & Geyer (1984) **Fehler! Textmarke nicht definiert.**
- Abbildung 4: Entfernungsabhängige Pegeländerung in dB (Links Ostsee, Rechts Nordsee) **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|---|
| AcTUP | Acoustic Toolbox, User Interface Post-processor |
| AIS | Automatic Identification System |
| ANSI | American National Standards Institute |
| AWZ | Ausschließliche Wirtschaftszone |
| BfN | Bundesamt für Naturschutz |
| BSH | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie |
| CPA | Closest Point of Approach |
| DNV | Det Norske Veritas |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| EU | Europäische Union |
| GB | Gigabyte |
| GEBCO | General Bathymetric Chart of the Oceans |
| MSFD | Marine Strategy Framework Directive |
| MSRL | Meeresstrategie Rahmenrichtlinie |
| RMS | Root Mean Square |
| RNL | Radiated Noise Level |
| SEANAT | Subsea Environmental Acoustic Noise Assessment Tool |
| SEL | Sound Exposure Level |
| sm | Seemeilen |
| SPL | Sound Pressure Level |
| TTS | Temporary Threshold Shift |
| UBA | Umweltbundesamt |

Zusammenfassung

Dieser Bericht behandelt die Ergebnisse des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Lärmkartierung deutscher Meeresgebiete - Erstellung von interaktiven Lärmkarten für Nord- und Ostsee als Bewertungsgrundlage zur Umsetzung der EU Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL)“ des Umweltbundesamts (FKZ 371025205).

Das Kernstück des Vorhabens bestand in der Entwicklung der Software *Subsea Environmental Acoustic Noise Assessment Tool*, kurz SEANAT, die eine Berechnung der Schallausbreitung für verschiedene Schallquellen in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der deutschen Nord- und Ostsee und eine Gegenüberstellung zu biologischen Grenzwerten erlaubt. Die Software wurde durch das *Centre for Marine Science & Technology*, Australien basierend auf dort bereits geleisteten Vorarbeiten erstellt und hinsichtlich Bedienbarkeit und Fehlerfreiheit geprüft.

Davor und teilweise zeitlich parallel zu dem im Rahmen des Vorhabens vorgenommenen Unterwasserschallmessungen wurde im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) das Hintergrundgeräusch in den Natura 2000-Schutzgebieten gemessen. Daraus konnten nützliche Hinweise zu Schallpegeln, Pegelschwankungen und Geräuschquellen abgeleitet werden.

Die in SEANAT hinterlegten numerischen Methoden für die Berechnung der Schallausbreitung berücksichtigen die relevanten Details der Meeresumwelt und ermöglichen eine sehr genaue Berechnung der empfangenen Schallpegel. Die größte Ungenauigkeit hat ihre Ursachen in nicht adäquater Quellbeschreibung und fehlerhafter Annahme der Bodeneigenschaften und hierbei insbesondere der Kompressionswellengeschwindigkeit und -dämpfung. Der Vergleich zwischen den mit der Software berechneten und den im Rahmen des Vorhabens in Nord- und Ostsee aufgenommenen Messdaten konnte zeigen, dass eine realitätsnahe Berechnung der Schallausbreitung theoretisch möglich ist, sofern hinreichend genaue Daten zur Beschreibung der Meeresumwelt verfügbar sind. Es ist weiterhin möglich, Umgebungsdaten wie beispielsweise akustische Eigenschaften des Meeresbodens aus beobachteten Schallpegelverläufen mithilfe von SEANAT zu rekonstruieren.

Summary

This report summarizes results of the research and development project “Noise mapping of Germans Seas – Production of noise maps for North Sea and Baltic Sea to be used as basis for assessment during implementation of the EU marine strategy framework directive (MSFD)” of the German Environment Agency (UBA, FKZ 371025205).

The core of the project was the development of the software Subsea Environmental Acoustic Noise Assessment Tool, in short SEANAT, which allows a calculation of the sound propagation for different sound sources in the Exclusive Economic Zone (EEZ) of the German North Sea and Baltic Sea. A functionality was implemented to compare modelled results to biological threshold values. Based on preceding work, the software was developed by the *Centre for Marine Science & Technology*, Australia, and tested with regard to usability and faultlessness.

Prior to this project, and partly in parallel with the underwater sound measurements carried out as part of the project, the underwater background noise in the Natura 2000 protected areas was measured on behalf of the German Federal Agency for Nature Conservation (BfN). Based on this this, useful information on sound levels, fluctuations of sound levels as well as data on noise sources could be derived.

The numerical codes for the calculation of sound propagation incorporated in SEANAT take into account the relevant details of the marine environment and allow a very accurate calculation of the received sound levels. The greatest inaccuracy is caused by inadequate source description and incorrect assumption of bottom properties, especially compressional wave velocity and attenuation. The comparison between the data calculated with the software and the measured data recorded in the North Sea and the Baltic Sea within the scope of the project showed that a realistic calculation of the sound propagation is theoretically possible, provided that sufficiently accurate data is available to describe the marine environment. Further, it is possible to reconstruct environmental data, such as acoustic properties of the seabed, from observed sound level characteristics by using SEANAT.

1 Einführung

Am 17. Juni 2008 wurde die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL, 2008/56/EG) durch das Europäische Parlament erlassen. Sie verpflichtet alle europäischen Meeresanrainerstaaten zur Erarbeitung und Durchführung nationaler Strategien, die dem Ziel der MSRL dienen, bis zum Jahr 2020 einen „guten Umweltzustand“ zu erhalten oder zu erreichen. Eine qualitative Beschreibung des Umweltzustandes wird dabei durch unterschiedliche Deskriptoren in Anhang I der Richtlinie vorgenommen, von denen der Deskriptor 11 den Eintrag von Energie adressiert. Zur Einleitung von Energie zählt unter anderem auch Unterwasserschall, der in impulshaften Schall und tieffrequenten Dauerschall differenziert wird.

Auf dem Weg zum guten Umweltzustand sollen drei Werkzeuge zum Einsatz kommen:

1. Definition der Umweltziele
2. Bewertung des aktuellen Umweltzustandes, z.B. durch Entwicklung und Anwendung geeigneter quantitativer Indikatoren und Monitoringprogramme, mit denen die Entwicklung des Umweltzustandes quantitativ beschrieben werden kann.
3. Definition geeigneter Maßnahmen zum Erreichen der Umweltziele

Die MSRL verpflichtet alle Anrainerstaaten europäischer Meeresgewässer zu einem Monitoring, durch das Daten des Deskriptors 11 erfasst und veröffentlicht werden. Als typischer, aber nicht verpflichtend festgelegter Rhythmus für die Veröffentlichung wird häufig ein Jahr gewählt. Durch die *EU Technical Group on Noise* (TG Noise) wurden zwei Indikatoren für Unterwasserschall in Form von „pressure indicators“ entworfen, die den Druck auf das marine Ökosystem infolge anthropogener Aktivitäten beschreiben:

- ▶ Indikator 11.1 (D11C1): Impulshafte Schallquellen sollen durch ein Schallregister erfasst werden, sodass kein messtechnisches Monitoring erforderlich ist.
- ▶ Indikator 11.2 (D11C2): für kontinuierlichen tieffrequenten Schall war im ursprünglichen Entwurf der „Monitoring guidance“ vorgesehen, dass Schallpegel in den Terzbändern 63 Hz und 125 Hz jährlich als energetischer Mittelwert ausgewertet werden sollen, sodass daraus für aufeinanderfolgende Jahre Trends ausgewertet werden können. Dabei war es den Mitgliedsstaaten freigestellt, die jährlichen Mittelwerte durch Messung oder durch Modellierung zu generieren. Eine Anzahl der Messpunkte und deren Positionen wurden nicht definiert.

In der Interpretation des BMUV wird der „gute Umweltzustand“ in Bezug auf Energieeinträge (Deskriptor 11) für die deutsche Ost- und Nordsee erreicht, wenn das Schallbudget die Lebensbedingungen der betroffenen Tiere nicht nachteilig beeinträchtigt. Alle menschlichen lärmverursachenden Aktivitäten dürfen sich daher nicht erheblich auf die Meeresumwelt auswirken.

Für deutsche Meeresgewässer ohne Beeinträchtigung durch anthropogene Energieeinträge wurden folgende operative Umweltziele festgelegt:

- ▶ 6.1: Der anthropogene Schalleintrag durch **impulshafte Signale** und Schockwellen führt zu keiner physischen Schädigung (z.B. einer temporären Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen) und zu keiner erheblichen Störung von Meeresorganismen.
- ▶ 6.2: Schalleinträge infolge **kontinuierlicher, insbesondere tieffrequenter Breitbandgeräusche** haben räumlich und zeitlich keine nachteiligen Auswirkungen, wie z.B. erhebliche Störungen (Vertreibung aus Habitaten, Maskierung biologisch relevanter Signale, etc.) und physische Schädigungen, auf Meeresorganismen

Als eine unter anderen Maßnahmen zur Erreichung der Umweltziele wird in den Maßnahmenkennblättern der Bundesregierung die Lärmkartierung der deutschen Meeresgebiete genannt. Im Rahmen dieses Projekts wird eine Software entwickelt, die in diesem Kontext eingesetzt werden kann.

2 Ziele des Vorhabens

2.1 Umwelt-Rahmenbedingungen

Die Geräuschkulisse im Meer setzt sich aus natürlichen und anthropogenen Beiträgen zusammen. Insbesondere durch die Schifffahrt, das Militär und die Offshore-Industrie hat sich das Hintergrundgeräusch seit Beginn des 20ten Jahrhunderts signifikant verstärkt. Bei den impulsartigen Schallquellen liegt der Schwerpunkt in Nord- und Ostsee auf *Rammgeräuschen*, bei den kontinuierlichen Schallquellen auf den Dauergeräuschen von *Schiffen*. Durch den stetigen Ausbau der Offshore-Windenergieerzeugung und die zunehmende Schifffahrt wird erwartet, dass sich der Hintergrundgeräuschpegel langfristig weiter erhöht, wenn keine entsprechenden Mitigationsmaßnahmen eingeleitet werden.

2.2 Technische Umsetzung eines Werkzeuges zur Abschätzung biologischer Wirkung

Das Ziel des Vorhabens bestand aus der Erstellung eines Werkzeuges, mit dem die Schallbelastung an jedem Punkt in der AWZ für eine beliebige Verteilung anthropogener Schallquellen prognostiziert werden kann. Dabei sollen vor allem Beitrag und Einflussbereich von Schallbelastungen unterschiedlicher Quellen abgebildet werden. Eine typische Anwendung ist z.B. die Einschätzung der Schallemissionen während der Bauphase eines Windparks in der Nähe eines Schutzgebiets. Die SEANAT Software ermöglicht es, für dieses Szenario eine Fläche zu ermitteln, in dem vorgegebene biologische Grenzwerte für die Schallbelastung überschritten werden. Anhand der Größe des akustisch belasteten Gebiets können die Konsequenzen für den Lebensraum abgeschätzt werden.

Das verwendete Schallausbreitungsmodell bildet die wichtigsten Effekte der Schallausbreitung in einem begrenzten Medium ab, zu denen zählen:

1. Reflexionen an der schallweichen Wasseroberfläche und am Meeresboden
2. Cut-off-Frequenz, abhängig von Wassertiefe und Beschaffenheit des Sediments
3. Beugung an Schallgeschwindigkeits-Schichtungen
4. Dissipation im Sediment
5. Frequenz-abhängige Schallabsorption

Um die Anwendung einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen, muss gewährleistet sein, dass eine sichere Bedienung der SEANET-Software auch ohne Expertenwissen möglich ist. Die Eingaben des Nutzers wurden aus diesem Grunde so weit wie möglich minimiert und die Software zudem Browser-basiert entwickelt, sodass keine Software-Updates des Nutzers nötig und die Rechenzeiten unabhängig von den Hardware-Ressourcen des Anwenders sind.

Mit der Software können sowohl der Ausbreitungsverlust wie auch das resultierende empfangene Schallfeld für beliebige Szenarien sowie biologisch bewertete Schallpegel abgebildet werden. Die Anwendung ist auf die deutschen Meeresgebiete (AWZ und Küstengewässer) beschränkt. Schalleinträge mit einem Abstand bis ca. 50 km außerhalb der Grenzen der AWZ können berücksichtigt werden. Die Modellierung der Schallquellen ist auf omnidirektional abstrahlende Punktquellen beschränkt.

3 Arbeitspaket 1: Schallmessungen in der Deutschen AWZ

Während die der Software unterliegenden quelloffenen Berechnungsalgorithmen von einer breiten Anwenderschaft entwickelt, getestet und validiert wurden und daher als recht genau angesehen werden können, liegt die wesentliche Unsicherheit für die Berechnung empfangener Pegel bei den Eingangsgrößen. Hierbei ist insbesondere das Schallgeschwindigkeitsprofil in Wasser und Boden, die Rauigkeit der Oberflächen und die Position sowie das Quellpegelspektrum der Schallquelle in der Wassersäule zu nennen. Die Qualität der Ergebnisse der Rechnung hängt daher vollständig davon ab, wie treffend die Eingangsdaten der Berechnung die realen Umweltbedingungen abbilden. Aus diesem Grund wurde jeweils eine punktuelle Überprüfung der Berechnungen durch Messungen auf See durchgeführt, um möglicherweise grundsätzliche Abweichungen identifizieren zu können. Gleichzeitig dienten die Messungen dazu, die tatsächlichen Schallpegel im Meeresgebiet und so weit wie möglich deren Ursachen zu ermitteln. Für die Messungen wurden autonome Rekorder für Langzeitaufzeichnungen verwendet, siehe Kapitel 3.3.

3.1 Positionen der Rekorder

Je Seegebiet wurde ein Rekorder eingesetzt. Als Auswahlkriterien für die Messposition lagen zugrunde:

- Berücksichtigung der Reichweiten von anthropogenen Geräuschen;
- Keine Ausbringung in Natura2000-Schutzgebieten, da dort parallel Rekorder des BfN ausgebracht waren;
- Wassertiefe möglichst größer als 20 m, damit tieffrequente Geräusche im Bereich zwischen 50 und 100 Hz auch in größerer Entfernung aufgenommen werden konnten. In diesem Frequenzbereich können sowohl Schiffe, als auch Rammgeräusche einen prägnanten Beitrag haben;
- Keine Ausbringung in der Nähe von Schifffahrtslinien, da hier genügend Daten von den BfN-Rekordern zu erwarten waren und es dort zudem schwieriger ist, Einzelschiffe zu erfassen. Letzteres war gewünscht, um den Verlauf des Ausbreitungsverlustes besser beobachten zu können. Außerdem gehörte es zu den Vorgaben, dass auch Zeiten ohne Schiffsverkehr aufgenommen werden sollten, um bewerten zu können, inwiefern Angaben aus der Literatur für die Gewässer der deutschen AWZ zutreffend sind;
- Der Ausbringungs- und Bergeaufwand sollte möglichst gering sein;
- Im Sinne der MSRL und den Vorstellungen zur Bewertung von tieffrequenten Impuls- und Dauergeräuschen sollte eine möglichst große Bandbreite von Geräuschen erfasst werden.

3.2 Messgerät

Für die Schallaufzeichnung wurde der autonome Unterwasserschallrekorders *DSG* der Firma *Loggerhead Instruments* gewählt. Bisherige Erfahrungen mit diesen Geräten ließen eine hohe Qualität der Schallaufzeichnung vermuten. Das Gerät ist zudem deutlich preisgünstiger als Konkurrenzprodukte. Technische Daten sind:

- Stromversorgung durch 24 D-Cell-Batterien
- Datenspeicher per SD-Karte (max. 128 GB).
- Abtastrate bis 80 000 Hz
- Vorverstärkung bis 20 dB
- Dynamik von ca. 80 – 90 dB (16 Bit)
- Vorhandene Hydrophone: HTI-96-Min/3V mit einer Empfindlichkeit von -169,9 dB V/μPa und -185,9 dB V/μPa
- Preis: 6.000 USD exkl. Hydrophon (Stand: Juni 2012)

- Die spezifizierten Werte lassen einen Einsatz unter den oben aufgezählten Rahmenbedingungen zu.

Die Schallmessungen sollten prägnante Einzelereignisse und typische Umweltgeräusche aufzeichnen. Daraus sollten für die Validierung der SEANAT Software einerseits Informationen zu den lokalen Schallausbreitungsbedingungen rekonstruiert werden, wozu sich z.B. einzelne vorbeifahrende Schiffe eigneten. Andererseits sollten natürliche Geräusche während einer möglichst großen Vielfalt an Wetterbedingungen aufgenommen werden. Für die Konfiguration des Rekorders musste deswegen ein Kompromiss zwischen Aufzeichnungsdauer und Samplingrate gewählt werden, um den geplanten Zeitraum von ca. 2 Monaten mit dem verfügbaren Speicher bei ausreichend hoher Abtastrate abdecken zu können. Es wurde daher eine unterbrochene Aufzeichnung mit 20 Minuten Aufnahme pro 2 Stunden mit 40 kS/s Samplingrate gewählt.

3.3 Rekorder in der Ostsee

Der Rekorder in der Ostsee wurde innerhalb der AWZ in der Kieler Bucht außerhalb der großen Schifffahrtswege auf Position 54°38,004'N | 010°13,097'E in der Nähe eines Schiffswracks ausgebracht. Hier wurde eine niedrige Gefährdung durch die Schleppnetzfischerei erwartet. Der Rekorder verblieb dort vom 29.08.2012 bis zum 15.11.2012 in einer Wassertiefe von 22 m, das Hydrophon sollte ca. 2 Meter über dem weitgehend schlammigen Meeresboden schweben. Da sich die Auftriebskörper entgegen der Angabe des Händlers als nicht druckfest erwiesen, lag der Rekorder tatsächlich ca. 50 - 100 cm über dem Meeresboden. Während des Messzeitraums wurden sowohl die Wind-, Niederschlags- und Seegangsverhältnisse in der Nähe des Rekorders aufgezeichnet, als auch die AIS-Daten (*Automatic Identification System*, verpflichtender Einsatz auf jedem Handelsschiff zur Kollisionsverhütung vorbeifahrender Schiffe).

3.4 Rekorder in der Nordsee

Der Rekorder in der Nordsee wurde in der AWZ der Deutschen Bucht auf Position 54° 42,495' N 006° 22,981' E in einer Wassertiefe von etwa 40 Metern ausgebracht, das Hydrophon befand sich ca. 4 Meter über dem sandigen Meeresboden. Dort befand er sich vom 09.07.2013 bis zum 08.09.2013. Die Position befand sich etwa 12 Seemeilen (sm) nördlich des im Bau befindlichen Windparks Global Tech 1, sodass eine Aufzeichnung von Rammschall sehr wahrscheinlich war. Das Seegebiet um den Rekorder ist in der Regel mäßig befahren.

3.5 Auswertung

Für die Auswertung des aufgezeichneten Unterwasserschalls wurde von DW-ShipConsult eine Software zur Frequenzanalyse von Schallaufzeichnungen mit großen Datenmengen entwickelt. Für dieses Projekt zur Lärmkartierung wurden damit Terzspektren in einer Zeitreihe mit 6 Sekunden und 1 Minute Auslösung berechnet. Damit lassen sich große Zeiträume übersichtlich als Terz-Spektrogramm darstellen, um Zeiträume zu identifizieren, in denen

- Schiffe den Rekorder passiert haben
- starker Regen oder hoher Seegang stattfanden
- impulshafte Schallereignisse (Rammungen, Sprengungen, Sonare) eingetragen wurden
- nur Hintergrundgeräusche ohne Schallquellen in der Nähe des Rekorders erfasst wurden.

Damit konnten aus dem Datensatz geeignete Einzelereignisse zum Testen der Software und für die Überprüfung der tatsächlichen Schallausbreitung ausgewählt werden. Die weitere Auswertung der Schallausbreitung erfolgte auf Grundlage der berechneten Terzen, die in eine Darstellung überführt

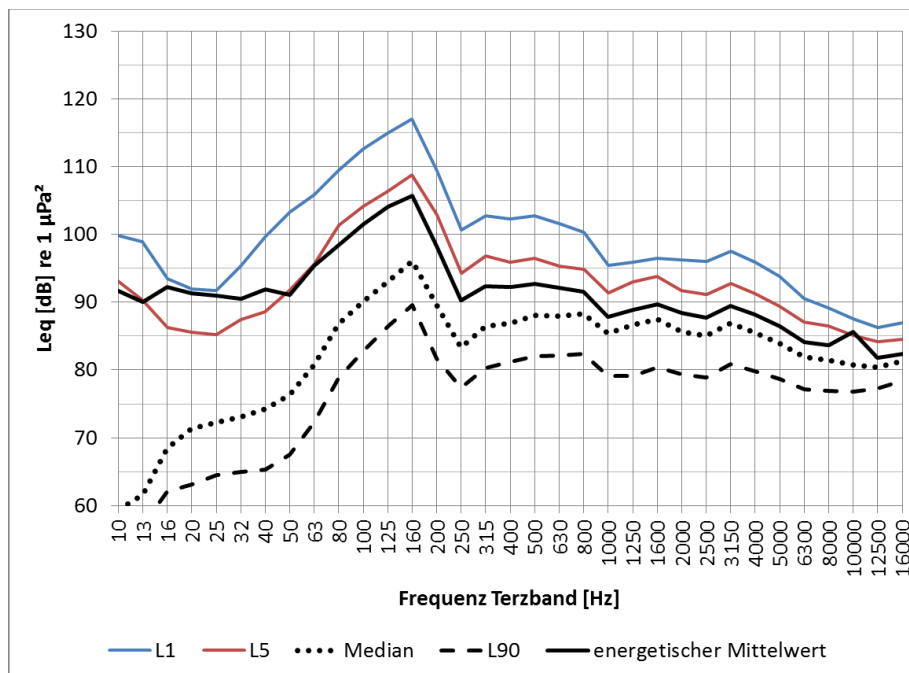
wurden, aus der der Ausbreitungsverlust abgeleitet werden kann. Als kompakte Darstellung des akustischen Zustands an der Messposition wurden weiterhin Perzentil-Statistiken aus der Zeitreihe der Terzen gebildet.

3.5.1 Auswertung Ostsee

Bedingt durch die Positionierung in einem Gebiet mit geringem Schiffsverkehr wies der Rekorder in der Ostsee relativ leise Messergebnisse auf. Der Rekorder befand sich in der Kieler Bucht in der Nähe des Sperrgebiets Schönhagen, welches von der Marine für die Ausbildung von Minentauchern genutzt wird. Aus diesem Grund finden dort des Öfteren Sprengungen von Übungsseeminen statt. Während des Messzeitraums konnten drei dieser Sprengungen aufgezeichnet werden.

Die Impulse der Sprengungen haben zur Übersteuerung des Messsystems geführt, daher kann der absolute Pegel für diese Ereignisse nicht angegeben werden.

Abbildung 1: Statistik Kieler Bucht, Messposition vor Sperrgebiet Schönhagen, dargestellt für den gesamten Zeitraum der Messung



Zu beachten ist, dass die Pegel unterschiedlicher Frequenzen bei den Perzentilen nicht zwangsläufig gleichzeitig gemessen wurden. So kann es sein, dass in einem Zeitraum sehr hohe Pegel in niedrigen Frequenzen auftraten, während die hohen Frequenzen sehr leise waren und umgekehrt. Die entsprechende Perzentile würde in diesem Falle einen durchgehend hohen Pegel zeigen. Die einzelnen Frequenzen der Perzentile können daher nicht dazu verwendet werden, um z.B. die maximalen Pegel bei einer Schiffspassage über alle Frequenzen abzulesen.

Die niedrige 90% Perzentile (L90) zeigt auf einem Niveau von ca. 80 dB, dass es in diesem Gebiet Zeiträume geben muss, in denen keine Schallerzeuger in der näheren Umgebung vorhanden sind. Es ergaben sich durch das gering befahrene Seegebiet vielfach „saubere“ Aufnahmen von eindeutig natürlichen Geräuschen, u.a. Regen und Seegang, ohne Überlagerungen von Schiffslärm. Der L90 und der Median korrespondierten gut mit durch Wille & Geyer (1984) angegebenen Literaturwerten für das Umwelthintergrundgeräusch in der Ostsee.

Alle Aufzeichnungen zeigen ein Maximum bei 160 Hz, was auf eine relativ hohe Cutoff-Frequenz zurückgeführt wird, die alle Beiträge unter 160 Hz dämpft. Angesichts der Wassertiefe von 22 Metern kann aus dieser ungewöhnlich hohen Cutoff-Frequenz abgeleitet werden, dass der Meeresboden von einem sehr weichen Sediment bedeckt ist. Gemäß Urick (1984) kann abgeleitet werden, dass die Schallgeschwindigkeit im Sediment sehr ähnlich zur Schallgeschwindigkeit im Wasser ist und eine schallweiche Grenze darstellt, die bei organischen Sedimenten mit eingeschlossenen Gasblasen auftreten kann (vgl. Wilson & Wood (2008)).

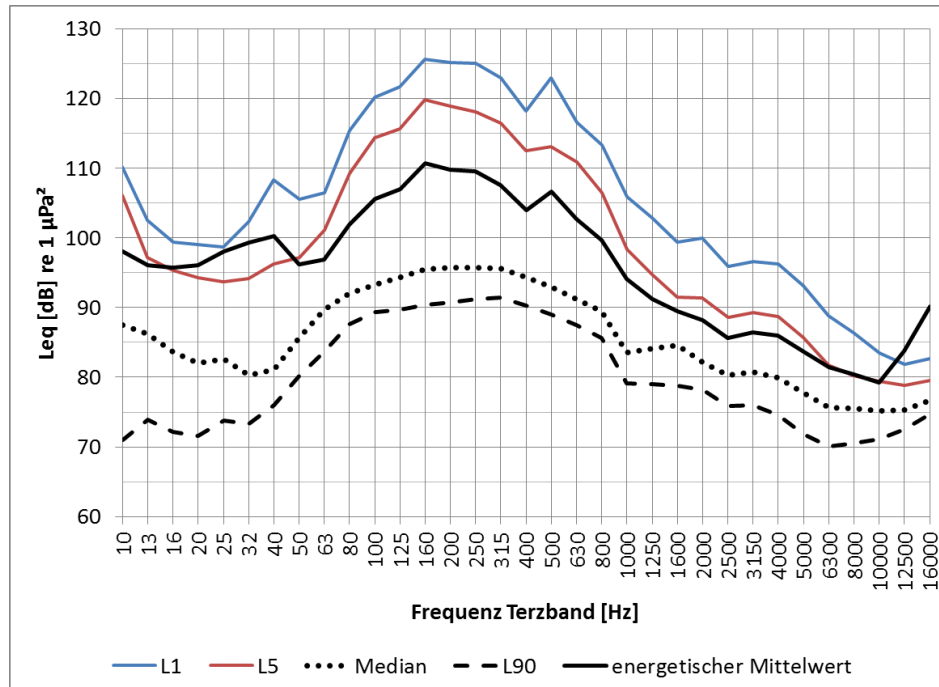
Weiterhin zeichnen sich alle Perzentile durch ein Minimum bei 250 Hz aus, das möglicherweise durch eine Interferenz mit dem Meeresboden verursacht wird. Eine sichere Erklärung wurde nicht gefunden.

3.5.2 Auswertung Nordsee

Die Aufnahmen der Rekorderposition in der Nordsee auf ca. 40 m Wassertiefe waren von den Rammarbeiten für den Windpark Global Tech I geprägt, welcher sich in einer Entfernung von ca. 15 sm befand. Die Rammungen erhöhten die Schalldruckpegel zwischen 50 und 1000 Hz signifikant in ca. 25% des Messzeitraums, deutlich sichtbar bei L1 und L5 (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Ergebnisse der Messungen in der Nähe des Windparks wurden durch Pehlke et al. (2013) veröffentlicht.

Der Median ähnelt in seinem Verlauf dem Median der Ostsee, jedoch ohne das dort vorhandene Minimum bei 250 Hz aufzuweisen.

Abbildung 2: Statistik der Schallmessung in der Deutschen Bucht an der Messposition 15 sm nördlich des Windparks Global Tech 1, dargestellt über den gesamten Zeitraum.



Durch den geringen Schiffsverkehr an der Messposition ergaben sich auch in der Nordsee viele „saubere“ Aufnahmen von natürlichen Schallereignissen, welche sich jedoch nur unwesentlich von den Aufnahmen in der Ostsee unterschieden. Die hohen Pegel im Bereich zwischen 100 Hz und 1000 Hz decken sich gut mit den Beobachtungen, die durch Wille & Geyer (1984) für die Nordsee wiedergegeben wurden.

4 Arbeitspaket 2: Prüfung existenter Vermessungsstandards

4.1 Standards zur Vermessung von Schiffen

Im Folgenden werden 4 Standards betrachtet, die vorrangig für die Vermessung in tiefem Wasser entwickelt wurden.

ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1

- ▶ ohne internationale Beteiligung in den USA entwickelt
- ▶ drei Genauigkeitsklassen
- ▶ definierter Aspektwinkel durch Anordnung von Hydrophonen in bestimmten Winkeln bei vorgegebenem Passierabstand
- ▶ extrem große, teure und schwer zu handhabende Installation bei hohen Genauigkeiten
- ▶ in der bestehenden Form muss der Standard wegen des großen Aufwands bei hohen Genauigkeiten und wegen unrealistischer Anforderung an die Genauigkeit der Messgeometrie als praktisch unbrauchbar beurteilt werden. Der Standard eignet sich nicht für die Anwendung in flachem Wasser
- ▶ Die Entfernungskorrektur erfolgt mit einem konstanten Faktor über alle Frequenzen, das Ergebnis ist ein *Radiated Noise Level*

ISO/TC 8/SC 2 N 176rev

- ▶ Anforderungen an die Messgeometrie ähnlich der kleinsten Genauigkeitsklasse des ANSI-Standards
- ▶ nur ein Hydrophon in 20 m Tiefe
- ▶ Geometrie führt in tiefem Wasser oder bei schwach reflektierenden Böden zu stark unterschätzten tieffrequenten Pegeln
- ▶ keine Erwähnung von Einflüssen aus Oberflächen- und Bodenreflexionen, eine reine Ergebnismeldung des Quellpegels ist für sich genommen nicht bewertbar

ISO/TC 43/SC 3/WG 1 Measurement of underwater sound from ships

- ▶ stark an ANSI (s.o.) angelehnt, daher gleiche Schwachpunkte
- ▶ ermittelt wird ein *Radiated Noise Level* zum Vergleich mit Schallforderungen

DNV Silent Class Notation

- ▶ Verfahren für den Nachweis akustischer Grenzwerte aus einer Bauvorschrift der Klassifikationsgesellschaft DNV zur Anwendung in flachem Wasser mit Tiefen zwischen 30 m und 100 m
- ▶ definiert Quellpegelspektren und ein Nachweisverfahren für Flachwasserverwendung
- ▶ Ein Vergleich der Messergebnisse mit den vorgegebenen Grenzwerten ist nur möglich, wenn die Messgeometrie eingehalten wird: Das Hydrophon muss 20 cm über dem Meereboden verankert werden, der Passierabstand beträgt ca. 150 m.

Zusammenfassend ist zum Stand der Normung bei Vermessung des Unterwasserschalls von Schiffen festzustellen, dass:

- ▶ die mit dem jeweiligen Standard ermittelten Quellpegel untereinander nicht vergleichbar sind;

- ▶ die Ergebnisse sind *Radiated Noise Level*, die ohne weitere Umrechnung nicht als Quellpegel in einer Modellierung verwendet werden können. Im Vergleich zu den als Eingaben benötigten Monopol-Quellpegeln werden die tieffrequenten Pegel der *Radiated Noise Level* zu niedrig wiedergegeben, sofern der Boden nicht stark reflektiert oder die Wassertiefe größer als die horizontale Entfernung zwischen Hydrophon und Schiff ist;
- ▶ Quellpegelspektren, die mit diesen Standards ermittelt wurden, als Eingaben in SEANAT nicht geeignet sind. Sie müssten um den Einfluss der Messgeometrie korrigiert werden.

4.2 Standards in der ökologischen Begleitforschung

Im Rahmen des Ausbaus der Offshore-Windenergie und im Zuge der Umsetzung der MSRL haben die Anrainerstaaten von Nord- und Ostsee Vorschriften erlassen, die die Umweltverträglichkeit der menschliche Meeresnutzung sicherstellen sollen und im Folgenden aufgeführt werden:

Deutschland:

- ▶ Standard StUK plus erarbeitet durch Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
- ▶ Rahmenbedingungen für die Installationsphase von Offshore-Windparks
- ▶ Festgelegte biologische Lärmschutzwerte während der Installation erarbeitet vom Umweltbundesamt (UBA), um eine auditive Verletzung von Meeressäugern (Schweinswalen) zu verhindern. Diese dürfen innerhalb eines Radius von 750 m vom installierten Pfahl nicht überschritten werden (160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ Einzelereignispegel (SEL), 190 dB re 1 μPa^2 Spitzenpegel (SPL peak-peak))
- ▶ Messvorschrift für eine Vergleichbarkeit der Nachweismessungen
- ▶ gesonderte Vorschrift definiert den Umfang für den Nachweis der Wirksamkeit von Schallminderungsmaßnahmen

Niederlande

- ▶ erster Teil: Definition physikalischer Einheiten und Messgrößen für die Beschreibung von Wasserschall
- ▶ zweiter Teil: Zusammenfassung der europäischen Mess- und Berichtsverfahren an Offshore-Baustellen
- ▶ der Standard fasst ein Mindestmaß an Anforderungen für Messungen, Berichte und Prognosen zusammen und zeigt Möglichkeiten für ein *Noise Mapping* auf

Großbritannien

- ▶ keine Grenzwerte für Schallemissionen während der Installationsphase
- ▶ lediglich Überwachung der Emissionen vor und während der Installation sowie der Betriebsphase
- ▶ Konfiguration der Messungen ist für jede Anwendung individuell abzustimmen

USA (Technical Guidance for Assessment and Mitigation of the Hydroacoustic Effects of Pile Driving on Fish)

- ▶ umfangreiches Dokument, das sich auf die Messgrößen Einzelereignispegel, Effektivwert und Spitzenpegel bezieht
- ▶ es werden die Auswirkungen von Impulsrammungen auf Fische bewertet

- Zusammenfassung von Messergebnissen für diverse Baustellen mit und ohne Schallminderungsmaßnahmen

5 Quellpegelvorgaben für die Software (Schallprofile)

Für die numerische Berechnung der Schallausbreitung mit den in SEANAT genutzten Modulen sind eindeutige Angaben zum Quellpegel erforderlich, wobei die Quelle grundsätzlich als Monopol (punktförmige, pulsierende, in alle Richtungen gleich strahlende Quelle) vorzugeben ist. Neben dem Quellpegel ist außerdem die Wassertiefe der Schallquelle anzugeben. Insbesondere höherfrequente Schallquellen wie beispielsweise Echolote sind oftmals nicht omnidirektional. Als weitere gerichtete Schallquelle sind Pfahlrammungen zu nennen, beschrieben z.B. in Elmer (2007) und Stokes et al. (2010). Die gerichtete Abstrahlung während der Pfahlrammung sowie die Schallabstrahlung durch das Sediment zurück in den Wasserkörper ist mit den verfügbaren Algorithmen in einer angemessener Berechnungszeit nicht eindeutig darstellbar. Als Näherung für typische, starke, tieffrequente und damit weitreichende Quellen wird in SEANAT immer ein Monopol-Quellpegel mit Angabe der Quelltiefe verwendet. Als Näherung für die Schallabstrahlung bei einer Pfahlrammung wird die Quelltiefe auf halber Wassertiefe eingesetzt.

Die dominierenden Schallquellen in der deutschen AWZ sind Schiffsverkehr und Impulsgeräusche z.B. von Rammprozessen.

5.1 Schiffe

Für Schiffe wurde ein bereits in einem anderen Zusammenhang entwickeltes akustisches Modell genutzt. Es errechnet aus schiffstechnischen Kennzahlen ein Monopol-Quellspektrum. Die berechneten Spektren decken weitgehend die zu erwartende Bandbreite des Geräusches größerer Schiffe in den fraglichen Meeresgebieten ab. Für diese Spektren sollte in der Software grundsätzlich von einer Quelltiefe von 2,5 m ausgegangen werden, sofern das betreffende Schiff nicht näher bekannt ist. Sobald detaillierte Daten vorliegen, sollte die Position der Propellerspitze in 12 Uhr Position angenommen werden, die bei großen Handelsschiffen abhängig vom Tiefgang zwischen 3 und 6 m liegt. Die genaue Quelltiefe ist im Allgemeinen nicht bekannt, ebenso wenig wie der genaue Zusammenhang zwischen Quellpegel und Quelltiefe für den Fall, dass es sich bei der dominierenden Schallquelle im tieffrequenten Bereich um Propellerkavitation handelt. Die 2,5 m Tiefe wurde für Schiffe, deren Größe und Tiefgang nicht bekannt ist, als sinnvoller Kompromiss angesichts dieser wenig bekannten Einflussgrößen abgeleitet.

Auf Literaturdaten von Schiffen wurde nicht zurückgegriffen, da diese aufgrund von fehlenden Standards, fehlendem Wissen oder anderen Gründen nicht hinreichend genau sind. Ein offener Punkt bleibt weiterhin die Auswirkung der Richtcharakteristik des vom Schiff abgestrahlten Schalls, der die Pegel je nach Blickrichtung um ca. 10 dB schwanken lässt und damit schwerer bewertbar macht, siehe auch Trevorrow (2008). Die Detailanalyse eines passierenden Schiffes zeigte klar die Abhängigkeiten von Richtwirkung und Boden- und Quellparametern.

5.2 Rammern

Das Rammgeräusch gelangt über Schallabstrahlung des Pfahls in das Wasser und Sediment, ist also eine Linienquelle. Als einziger Parameter für den Quellpegel wird die Schlagenergie herangezogen. Der Pfahl wird als Punktquelle in der Mitte der Wassertiefe modelliert, da Eingaben von Linienquellen nicht möglich sind. Eine weitere Schwierigkeit stellt die Berücksichtigung von Sekundärmaßnahmen dar. Wird ein zu rammender Pfahl von einem Blasenschleier umgeben, wird die Schallausbreitung über das Wasser behindert. Es gibt Hinweise, z.B. von Stokes et al. (2010), dass die verbleibende

Schallübertragung durch den Boden und von dort wieder ins Wasser eine solche Barriere umgehen kann und so deren Wirksamkeit begrenzt. Sollte das so sein, wird das in der Software verwendete Modell möglicherweise nicht ausreichen, weil eine Anordnung von Schallquellen im Boden nicht möglich ist. Der Schallausbreitungsweg über den Boden und seine Wirkung auch in größerer Entfernung ist Gegenstand eines Teilprojektes des Forschungsvorhabens BORA.

5.3 Bagger

Der abgestrahlte Schall eines Laderaum-Saugbaggers, welcher bei den meisten Anwendungen zum Einsatz kommt, setzt sich aus diversen Einzelquellen zusammen, die in sehr unterschiedlicher Wassertiefe wirken. Neben diversen Studien, die sich einzelnen Baggern widmen, existieren zwei umfangreiche Untersuchungen von de Jong et al. (2010) und Robinson et al. (2011), wo die akustischen Emissionen einer umfangreichen Baggerflotte bewertet wurden. Die Ergebnisse der Wasserschallmessungen in diesen Studien zeigen keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Baggergröße bzw. -leistung und abgestrahltem Schall. Die Beschaffenheit und Korngröße des Baggerguts beeinflussen vor allem den hochfrequenten Anteil des Spektrums: Grober Kies und Schotter erscheinen deutlich lauter als feiner Sand.

In der SEANAT Software wird der Bagger durch eine Monopol-Quelle auf 4 Metern Tiefe abgebildet. Dadurch wird der Einfluss des Lloyd-Mirror Effekts auf tiefe Frequenzen für alle Beladungszustände gut abgebildet. Für den Ausbreitungsverlust der hohen Frequenzen, die durch die Pumpe auf halber Wassertiefe erzeugt werden, spielt die Quelltiefe eine untergeordnete Rolle. Somit ist der Fehler, der durch eine Verschiebung der Quelle entsteht, in großen Entfernungen vernachlässigbar klein.

5.4 Seismik

Für die Erzeugung tieffrequenter Impulse werden Airguns (Luftpulser) als derzeitigem Stand der Technik verwendet. Sie bestehen aus einer Hochdruckluftkammer, die sehr schnell geöffnet wird. Das sich entspannende Gas erzeugt einen Druckimpuls mit hohem Pegel bei tiefen Frequenzen. Die abgestrahlten, tieffrequenten Schallwellen unterliegen geringer Dämpfung und dringen deswegen besonders tief in den Boden ein. Reflexionen von unterschiedlichen Tiefen werden durch eine nachgeschleppte Hydrophonkette erfasst. Das Schiff zieht eine oder mehrere Airguns und die Hydrophonkette (Streamer) bei geringen Geschwindigkeiten (z.B. 4 Knoten) hinter sich her, während die Luftkammer nach jedem Schuss über Hochdruckluftverdichter geladen werden. Die Schussintervalle richten sich nach der Aufgabe und liegen typischerweise im Bereich 10 bis 60 Sekunden. Für die seismischen Untersuchungen selbst ist nur der nach unten abgestrahlte Schall von Interesse, aber es gibt auch signifikante horizontale Anteile, die aber durch den Lloyd Mirror-Effekt gemindert werden. Neben Airguns gibt es noch sogenannte Sparker und Boomer als weitere Impulsquellen, die Schallpegelmaxima bei höheren Frequenzen haben, allerdings mit absolut niedrigeren Pegeln. Spektren liegen dafür nicht vor.

5.5 Explosionen

Explosionen werden durch Sprengungen für zivile Zwecke (bspw. Entschärfen von Munitionsaltlasten) und militärische Übungen (Sprengen von Minen, Tests von Unterwasserwaffen, Ansprengversuche im Rahmen von Schocktests) verursacht. Es sind zweifellos die lautesten anthropogenen Geräusche, die sich darüber hinaus durch einen raschen Anstieg des Schallsignals hervortun. Im Rahmen der Beobachtung mit den Rekordern in Nord- und Ostsee traten im Messzeitraum Explosionen auf, wobei eine Zuordnung nur in der Ostsee gelang. In beiden Fällen wurde der Rekorder übersteuert, obwohl das Ereignis mehrere Seemeilen entfernt war. Explosionen können wie u.a. auch Airguns mit einem Spektrum und einer entsprechenden Quelltiefe dargestellt werden. Dabei soll ein äquivalenter

Quellpegel angenommen werden, der die nichtlineare Schallausbreitung im Nahbereich der Quelle berücksichtigt.

5.6 Militärisches Sonar

In der AWZ kommen militärische Sonare von Schiffen der Marine verschiedenster Nationen zum Einsatz. Genaue Angaben gibt es dazu nicht. Es werden sowohl am Schiffskörper angebrachte Sonare mit typischen Frequenzen um 7000 Hz, als auch Schleppsonare, die bei 1000 Hz und weit darunter arbeiten, verwendet. Ein besonderes Merkmal der Sonare ist der sehr hohe Pegel von 220 bis 230 dB bei recht hoher Frequenz – ein Eintrag, den es in der Natur nicht gibt. Ein Sonar mit einem Quellpegel von 220 dB bei 7000 Hz würde bei Annahme sphärischer Ausbreitung und trotz Absorption in 1000 m Entfernung mehr als 80 dB über jedem natürlichen Geräusch liegen.

5.7 Natürliche Geräusche

Die wesentlichen natürlichen Quellen sind Wind und Wellen. Es handelt sich hierbei um Dauergeräusche mit einer von der Oberfläche vorzugsweise nach unten gerichteten Abstrahlung.

Natürliche Geräusche wurden in Nord- und Ostsee sehr gründlich untersucht, z.B. durch Wille & Geyer (1984), siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Eine statistische Analyse der Umweltparameter und Schallpegel ergab, dass die Windgeschwindigkeit die stärkste Korrelation mit dem Pegel des natürlichen Geräuschs hat. Im Rahmen der Entwicklung der SEANAT Software konnten keine umweltbedingten Geräusche berücksichtigt werden. In einer möglichen Weiterentwicklung der Software sollte diese Erweiterung mit überschaubarem Aufwand realisiert werden können.

Abbildung 3: Literaturdaten zum Umweltgeräusch (spektrale Darstellung in 1 Hz Bandbreite) in der Ostsee (links) unNordsee (rechts). Entnommen aus Wille & Geyer (1984)

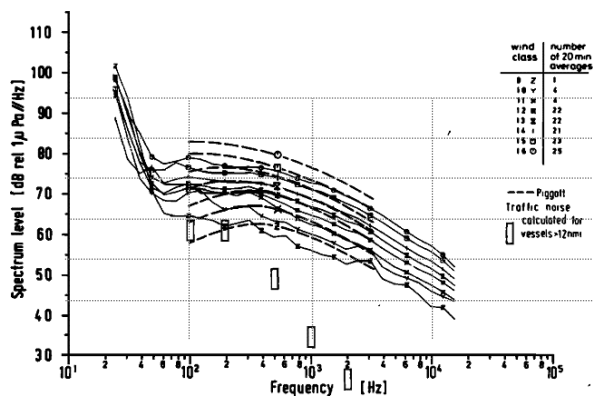


FIG. 6. Ambient noise third octave spectra in comparison with computed traffic noise contribution, Baltic Sea, 3-day averages, October (broken lines: Piggott).⁷

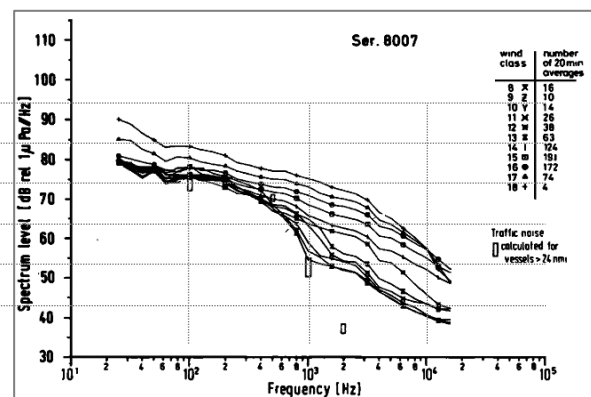


FIG. 5. Ambient noise third octave minimum spectra in comparison with computed traffic noise contribution, FPN region, October.

6 Umweltparameter

Die Schallausbreitung in Nord- und Ostsee wird durch saisonal und örtlich stark variierende Parameter beeinflusst. Sowohl der Wasserkörper, als auch der Meeresboden sind inhomogen und ihre Eigenschaften verändern sich in Abhängigkeit von der Tiefe und der geographischen Position. Der Wasserkörper ist darüber hinaus zusätzlich saisonalen Schwankungen unterworfen (siehe z.B. Nissen

(2004)). Insbesondere in der Ostsee gibt es ausgeprägte, jahreszeitabhängige saline und temperaturabhängige Schichtungen in der Wassersäule. In Versuchen von Wille & Geyer (1984) wurden in der Ostsee Schwankungen der Ausbreitungsverluste von ca. 15 dB in 10 km Entfernung bei 1 kHz gemessen, während die Differenz in der Nordsee, wo die Schwankungen der physikalischen Eigenschaften weniger stark ausgeprägt sind, lediglich 8 dB betrug.

Die Beschaffenheit des Oberflächensediments in der Nordsee wurde u.a. im Rahmen des Projektes „Geopotential Deutsche Nordsee“ ermittelt. Während die Beschaffenheit der Oberfläche in großen Bereichen nahezu konstant ist, deuten Forschungen der Christian-Albrechts-Universität Kiel im Projekt BORA darauf hin, dass die tieferen Schichtungen deutlich stärker variieren. Trotz intensiver Bemühungen konnte keine Bezugsquelle für physikalische Bodendaten (insbesondere für die Schallgeschwindigkeit) für Nord- und Ostsee gefunden werden. Eine umfangreiche Untersuchung der oberen Sedimentschichten ist im Projekt BORA erfolgt, dessen Ergebnisse bei Abgabe dieses Berichts noch nicht veröffentlicht waren. Die Software arbeitet daher mit Näherungsdaten, welche in verschiedenen Forschungsvorhaben, z.B. Hyprowind, erstellt wurden.

6.1 Arbeitspaket 3: Untersuchung der spezifischen Schallausbreitung

Für Beides, Dauergeräusche und Impulse bzw. Kurzzeitgeräusche kommen unterschiedliche Herangehensweisen in Betracht. Das Dauergeräusch kann unabhängig von seinen tatsächlichen zeitlichen Schwankungen über einen Mittelwert, den L_{eq} , beschrieben werden. Die vorliegenden Messdaten wurden in L_{eq} Spektren mit 60 Sekunden Mittelungszeit ausgewertet. Bei Impulsen will man die zeitliche Begrenztheit und den unterschiedlichen Charakter von Impulsen auf einfache Weise in einem einfachen Wert zusammenfassen und hat dafür den Schallexpositionspegel L_E gewählt, der äquivalent auch als Einzelereignispegel oder Sound Exposure Level (SEL) bezeichnet wird. Damit bleibt unberücksichtigt, dass der Impuls z.B. kurz und laut oder länger und dafür leiser ist. In diesem Vorhaben wurde nur das Verhalten eines Schallfeldes bei einzelnen Frequenzen und deren energetischer Überlagerung untersucht und nicht dessen zeitlicher Verlauf. Alle mit dem zeitlichen Verlauf zusammenhängenden Änderungen eines Signals werden nicht beschrieben, um die Komplexität und damit den Zeitaufwand der Berechnungen so zu beschränken, dass die Simulation mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand durchgeführt werden kann. Dadurch, dass die Simulation ausschließlich im Frequenzbereich erfolgt, kann insbesondere kann der Spitzenpegel L_{peak} nicht dargestellt werden. Im parallel laufenden Forschungsvorhaben BORA wurde eine Methode zur zeitbasierten Berechnung entwickelt, die wegen des hohen Rechenaufwandes auf eine 2-dimensionale Darstellung beschränkt sein ist. Flächenmodelle, wie sie in der SEANAT Software abgebildet werden, können darüber nicht beschrieben werden.

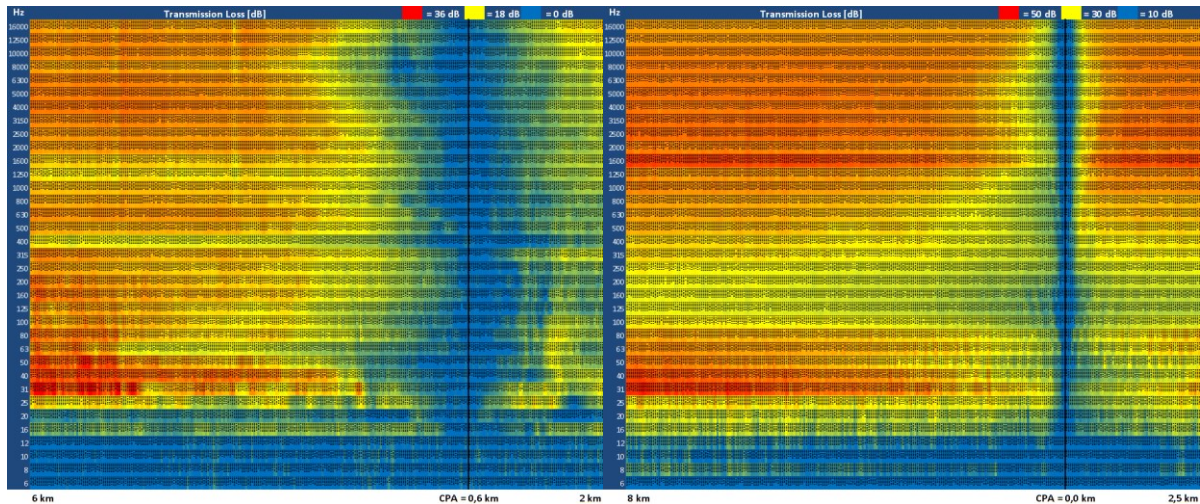
Mit Hilfe von AIS-Daten konnten sowohl für die Nordsee als auch für die Ostsee Zeiträume identifiziert werden, in denen Schiffe sehr dicht an den Rekorden vorbeifuhren. Für die beiden untersuchten Schiffe wurde zusätzlich darauf geachtet, dass bei der Passage kein Regen und nur geringer Seegang mit Wellenhöhen unter 0,5 m herrschte. Es handelte sich bei beiden untersuchten Schiffen um Küstenmotorschiffe (*Kümos*), es sind jedoch nur für die Schiffspassage in der Ostsee umfangreiche technische Daten zum Schiff vorhanden. Die Messposition in der Nordsee im Zeitraum der Messungen wurde nicht durch landbasierte AIS Empfänger abgedeckt.

Zur Untersuchung des Ausbreitungsverlusts wurden u.a. Diagramme erstellt, die die Ausbreitungsverluste der jeweiligen Frequenzen in Abhängigkeit zur Entfernung zeigen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der Ausbreitungsverlust ergibt sich darin aus der Differenz zwischen dem gemessenen Pegel in der entsprechenden Entfernung und dem Pegel der jeweiligen Frequenz im Punkt der nächsten Annäherung (CPA, *Closest Point of Approach*).

Die gemessenen Ausbreitungsverluste wurden mit den Ergebnissen der SEANAT Software für den jeweiligen Schiffskurs verglichen, um die Qualität der berechneten Ergebnisse zu bewerten.

Für weitere Informationen zu dieser Auswertung wird auf die Langversion dieses Berichtes verwiesen, der auf Nachfrage eingesehen werden kann.

Abbildung 4: Entfernungsabhängige Pegeländerung in dB (Links Ostsee, Rechts Nordsee)



6.2 Bereitstellung weiterer Datensätze

Bathymetrie

Für die Bathymetrie wurde auf Karten aus der frei zugänglichen Datenbank GEBCO zurückgegriffen, die in einer Auflösung von 0,5 Seemeilen kostenfrei im Internet verfügbar sind.

Schallgeschwindigkeitsprofile

Informationen zu Schallgeschwindigkeitsprofilen des Wasserkörpers wurden vom BSH bereitgestellt. Sie beinhalten die tiefenabhängigen Schallgeschwindigkeiten für diverse Messstationen über die Jahre 2001 bis 2011. Daraus wurde ein jahreszeitlich und örtlich repräsentativer Datensatz für beide Meeresgebiete abgeleitet.

Wetterstatistik

Da Seegang und Wind nicht unbedingt eng miteinander korrelieren (Seegang, der durch Wind aufgebaut wird, hängt von der Einwirkzeit und -strecke ab), wurden sowohl Seegangs- als auch Windmessdaten beschafft. Seegangsmodelldaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt, während die Windmess- und Niederschlagsdaten aus frei verfügbaren Internetquellen abgerufen werden konnten.

Geographische Grenzen der deutschen AWZ

Die geographischen Grenzen der deutschen AWZ konnten kostenfrei als Shape-Dateien aus dem Internet geladen werden.

7 Entwicklungsstand der Software

7.1 Konzept zur Berechnung der Schallausbreitung

Die Software SEANAT berechnet Schallfelder für definierte Schallquellen in der deutschen AWZ. Die Schallausbreitung wird räumlich berechnet und farbkodiert in verschiedenen Ansichten dargestellt. Für die Berechnung kommt ein hybrides numerisches Modell, das tieffrequent Annäherungslösungen der Helmholtz-Differentialgleichung der Wellenausbreitung berechnet und hochfrequent auf ein Strahlenmodell (Raytracing) zurückgreift.

Die Software basiert auf Vorarbeiten des *Centre for Marine Science & Technology der Curtin-University* (Perth, Australien) unter anderem der *Acoustic Toolbox, User Interface Post-processor (AcTUP)*. Diese auf Matlab © basierte Software bündelt diverse, frei verfügbare Berechnungsmethoden für Schallausbreitung unter Wasser in einer gemeinsamen Benutzeroberfläche, welche eine einheitliche Umgebung für mehrere Berechnungsmodule anbietet. Für SEANAT wurden die Berechnungsmodule *RAMGeo* (*Näherungslösung der Helmholtzgleichung*) und *BELLHOP* (*Raytracing*) ausgewählt. Beide Module haben ihre Grenzen, welche im Programm selbst oder in den Eigenheiten der Umgebung begründet sind. So rechnet *RAMGeo* keine Aufgaben unter einer bestimmten Frequenz je nach Wassertiefe, in unserem Fall ca. 40 Hz. Da sich diese Frequenzen ohnehin schlecht in den flachen Gewässern der AWZ ausbreiten, ist diese Einschränkung für die Anwendung in den Gewässern der deutschen AWZ eher belanglos. *RAMGeo* rechnet bis 2000 Hz, darüber hinaus kommt *BELLHOP* zum Einsatz.

7.2 Biologische Bewertungskriterien

Während für eine umfassende Bewertung der Auswirkungen von kontinuierlichen Schalleinträgen auf marine Lebewesen und damit für eine sachgerechte Ableitung von biologischen Grenzwerten noch weitere wissenschaftliche Grundlagen erarbeitet werden müssen, ist die Datenlage für impulshafte Einträge ausreichend, um erste Vorgaben formulieren zu können.

Die freigesetzte Schallenergie durch impulsartige Signale wie z.B. beim Rammen von Gründungsstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen hat, sobald sie in die Luft oder in den Wasserkörper abgegeben wird, auf weite Distanzen das Potenzial, marine Säugetiere sowie andere Meereslebewesen zu stören und in einem gewissen Radius physisch zu schädigen. Unmittelbar an der Rammstelle ist mit Verletzungen der Tiere zu rechnen, wenn keine Lärminderungsmaßnahmen getroffen werden.

Das Umweltbundesamt (UBA) empfiehlt daher die Anwendung eines dualen Lärmschutz-Kriteriums auf der Grundlage vorliegender wissenschaftlicher Untersuchungen. Schweinswale sollten keinen Lärmpegeln ausgesetzt werden, die zu einer auditorischen Beeinträchtigung im Sinne einer Temporären Hörschwellenverschiebung (TTS) führen können. In einer Entfernung von 750 Metern von der Schallquelle dürfen ein Einzelereignis-Schallexpositionspegel (SEL) von 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ und ein Spitzenschalldruckpegel ($\text{SPL}_{\text{peak-peak}}$) von 190 dB re 1 μPa^2 nicht überschritten werden, wenn Schäden an Schweinswalen nach derzeitigem Stand des Wissens ausgeschlossen werden sollen. Das BSH als Genehmigungsbehörde wendet diese vom Umweltbundesamt abgeleiteten Lärmschutzwerte in ihren Genehmigungen in der Nebenbestimmung 14 als einzuhaltende Auflagen an. Weiterhin sind sie mittlerweile integraler Bestandteil des Schallschutzkonzeptes der Bundesregierung für die Nordsee.

Dieser Grenzwert von 160 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ für den Einzelereignis-Schallexpositionspegel wurde in SEANAT hinterlegt, wodurch eine Visualisierung der Einhaltung und Überschreitung infolge individueller und gleichzeitiger Schalleinträge möglich ist. Neben der Evaluierung der Empfindlichkeit heimischer Schweinswale für impulsiven Schall und Betrachtung weiterer wesentlicher Aspekte wie der langsameren Fluchtgeschwindigkeit von Mutter-Kalb-Paaren, der Ermüdung von Tieren – und damit ebenfalls einhergehenden Abnahme der Schwimmgeschwindigkeit – oder der Erholungszeit des Gehörs

muss die biologische Relevanz von Unterwasserschalleinträgen auch für andere Meeressäuger und Fische weiterführend untersucht werden. Diese notwendig zu leistenden Arbeiten sind u.a. Teil des Forschungsprogramms des BfN, welches sich mit den Auswirkungen von Unterwasserschall auf marine Vertebraten (Wirbeltiere) beschäftigt. Auf Grundlage neuer Erkenntnisse können weitere biologische Grenzwerte festgelegt werden, die in Folge in SEANAT hinterlegt und damit in die Bewertung einbezogen werden müssen.

7.3 Genauigkeit der durch SEANAT berechneten Schallpegel

Laut z.B. Robinson et al. (2011) können die für die Berechnung verwendeten Algorithmen als „genau“ betrachtet werden. Somit hängt die Genauigkeit des Rechenergebnisses nur von den Eingaben (Quellenbeschreibungen und Umweltparameter) ab. Da die Eingaben jedoch immer eine unvermeidbare Toleranz besitzen, entstehen Abweichungen zwischen der Berechnung und dem Messwert auf See.

Der Beitrag der Parameter zur Toleranz unter Berücksichtigung der Qualität der verfügbaren Information lässt eine Zielgenauigkeit von ± 5 dB unterstellen. Als Beispiel: Bei einer Quelltiefe von weniger als 3 Metern ist es erforderlich, die tatsächliche Quelltiefe genau zu kennen, um bei tiefen Frequenzen die angestrebte Prognosegenauigkeit erreichen zu können. Wenn die Quelltiefe hingegen mehr als 5 Meter beträgt, dann hat dieser Parameter einen untergeordneten Einfluss auf die Prognosegenauigkeit, sodass eine ungenaue Eingabe der Quelltiefe das Ergebnis nicht wesentlich verfälscht:

- Quelltiefe
 - < 5 m: hoch
 - 5 m: gering
- Schallgeschwindigkeitsprofil im Wasser:
 - Kurze Entfernung: gering
 - Große Entfernung: hoch
- Schallgeschwindigkeit an Grenzfläche Wasser-Boden: hoch
- Schallgeschwindigkeitsprofil im Boden:
 - Kurze Entfernung: gering
 - Große Entfernung: mittel
- Absorption im Boden:
 - Kurze Entfernung: gering
 - Große Entfernung: groß
- Abweichung von Default Bathymetrie: gering
- Absorption bei hohen Frequenzen und großen Entfernungen: hoch

8 Empfehlungen für die Etablierung eines Langzeitmonitoring gemäß MSRL

Laut MSRL soll hinsichtlich des Energieeintrages in Form von Schall in die europäischen Meere der Umweltzustand von den Mitgliedsstaaten erfasst und überwacht werden, sowie ein „guter Umweltzustand“ beschrieben und hergestellt werden. Die Betonung liegt hierbei für impulshafte Schalleinträge auf mittleren bis tiefen und für kontinuierliche Schalleinträge auf tiefen Frequenzen. Die dominanten Schallquellen im Meer sind Dauergeräusche durch Schiffsverkehr, Wind und Wellen sowie Impulsgeräusche durch Offshore-Aktivitäten (insbesondere Rammvorgänge), seismische Untersuchungen und Explosionen.

8.1 Möglichkeiten der Beschreibung des Umweltzustandes

Der akustische Umweltzustand kann sowohl über den äquivalenten Dauerschallpegel L_{eq} beschrieben werden, welcher den über die Zeit gemittelten Dauerschallpegel unabhängig von kurzzeitigen Schwankungen beschreibt; als auch über die insgesamt eingetragene Energie von Einzelereignissen, wahlweise mit oder ohne Dauergeräusche, z.B. als Einzelereignispegel L_E . Andere Möglichkeiten der Beschreibung sind ebenfalls denkbar, beziehen sich aber in der Regel auf spezielle Fälle.

Alle Beschreibungsmöglichkeiten lassen sich statistisch über mehr oder weniger lange Zeiträume betrachten. Wichtigste Kennzahl ist der energetische Mittelwert L_{eq} , (äquivalent auch bezeichnet als Effektivwert oder RMS) der die akustische Intensität mittelt. Auch der Median (der Wert, der die größeren 50% und die kleineren 50% voneinander trennt) und die entsprechenden Perzentile werden genutzt. Die Verhältnisse zwischen diesen statistischen Größen treffen eine Aussage über die Schwankungsbreite der unterliegenden Daten. In der Technischen Arbeitsgruppe der EU zu Unterwasserschall (TG Noise) konzentriert man sich auf den energetischen Mittelwert der Terzbänder 63 Hz und 125 Hz über den Zeitraum eines Jahres, der für sich allein genommen aber nicht aussagekräftig genug für die Beschreibung des Umweltzustandes ist.

8.2 Erkenntnisse aus den bisherigen Untersuchungen vor dem Hintergrund der Umsetzung der MSRL

Nach vorläufiger Auswertung der Rekorder, die im Auftrag des UBA und BfN ausgelegt wurden, ergaben sich folgende Erkenntnisse mit Relevanz für die zukünftige Ausgestaltung des Langzeitmonitorings von Unterwasserschall im Sinne der MSRL:

- ▶ Die Entfernung, in der sich Schiffsgeräusche vom Hintergrundgeräusch abheben, liegt abhängig von Quellpegel und Störpegel in der Größenordnung 3 bis 10 km
- ▶ Die Dauerschallpegel liegen in Schifffahrtslinien kontinuierlich sehr hoch
- ▶ Die Reichweite von Impulsschall bei Pfahlrammungen beträgt, abhängig vom Quellpegel, bis zu 50 km. Wenn keine Schallminderung zum Einsatz kommt, heben sich die Rammgeräusche in noch größerer Entfernung vom Hintergrundgeräusch ab. Das Geräusch verändert sich stark mit größerer Entfernung
- ▶ Es empfiehlt sich eine Unterscheidung zwischen Nahbereich und Fernbereich vorzunehmen. Die Empfehlung für eine Grenzsetzung liegt bei 1 bis 2 km
- ▶ Die Position der Rekorder beeinflusst stark das statistische Ergebnis für den Schallpegel
- ▶ Sehr laute Einzelereignisse müssen aus der Bewertung herausgenommen werden, wenn nur der energetische Mittelwert über den gesamten Messzeitraum an einer Rekorderposition als repräsentativ für ein größeres Gebiet angesehen werden soll. Das beinhaltet auch gelegentlich in direkter Nähe des Rekorders vorbeifahrende Schiffe.
- ▶ Eine Bewertung der Messergebnisse erfordert eine Unterscheidung zwischen natürlichen und anthropogenen Quellen. Das ist derzeit nur durch händisches Auswerten für Einzelfälle möglich und kann zukünftig durch geeigneter Software weitgehend automatisiert werden
- ▶ Die Berechnung eines Schallfeldes ist mit hoher Präzision möglich, wird aber begrenzt durch wenig bekannte Eigenschaften von Quellen und Ausbreitungsbedingungen. Wenn eine Schallquelle hinreichend genau beschrieben werden kann, ist es leicht möglich, die Folgen von Parametervariationen zu bewerten (Beispiel: Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit).

8.3 Monitoring-Philosophie

Die Philosophie eines Monitorings von Unterwasserschall in deutschen Meeresgebieten ist von folgenden Maximen geprägt:

- ▶ Möglichst weitgehende Simulation der Schallpegelverteilung. In der Aufbauphase Validierung der simulierten Ergebnisse durch mindestens 5 Messpositionen.
- ▶ Möglichst geringer Einsatz von akustischen Messungen und diese an vorhandenen Messstationen
- ▶ Voraussetzung ist Kenntnis der Unterwasserlage. Für Schiffe können die akustischen Kennzahlen möglicherweise aus den AIS Daten gewonnen werden.

Folgende Arbeiten sind in Folge zu diesem Projekt zu leisten:

- ▶ Das AIS Datenprotokoll muss über ein Expertensystem mit einem akustischen Quellspektrum verbunden werden. Das ist besonders deshalb schwierig, weil akustisch sehr unterschiedliche Schiffstypen im Protokoll nicht unterschieden werden. So sind Massengutfrachter und Containerschiffe im AIS Protokoll beides „Frachtschiffe“. Anhand von schiffbaulichen Parametern (z.B. Längen/Breitenverhältnissen) sollten sie sich jedoch unterscheiden lassen.
- ▶ Eine Berechnung des Schallfeldes um eine Schallquelle muss lokal parametrisiert werden, um die Berechnungszeiten von Schallkarten zu reduzieren. Das bedeutet, dass jedem Punkt der AWZ ein quellen- und frequenzabhängiger Ausbreitungsverlust zugewiesen wird. Dieser lässt sich durch eine Software wie SEANAT recht exakt berechnen. Zur Berechnung der Parametrierung ist eine weitere Automatisierung der Software notwendig.
- ▶ Nach Erledigung dieser Arbeiten ist eine umfassende Schallfeldsimulation der deutschen AWZ möglich. Es sollten sowohl die verwendeten Quellpegel, als auch die berechneten Ergebnisse durch Messungen validiert werden. Grafische Darstellung der berechneten Schallpegel soll einen Vergleich mit aktuellen und perspektivischen Grenzwerten für die Störung und Verletzung von Indikatorarten ermöglichen.
- ▶ Für die zur kontinuierlichen Validierung erforderlichen Messstationen müssen die o.g. Arbeiten durchgeführt werden, um einen direkten Vergleich mit den Simulationsergebnissen zu ermöglichen und insbesondere, um die Trennung zwischen natürlichen und anthropogenen Geräuschen zu gewährleisten.

8.4 Mögliche Vorgehensweise für die Etablierung eines Monitorings

Im Folgenden wird die konkrete Vorgehensweise für die Etablierung eines Monitoringsystems in der deutschen AWZ beschrieben. Dabei liegt der Schwerpunkt auf kontinuierlichen Geräuschen durch den Schiffsverkehr und Impulsgeräuschen durch Rammarbeiten, seismischer Exploration und Explosionen. Eine Konfiguration auf andere Quellen ist möglich.

Die Arbeiten können in folgenden Schritten erfolgen:

1. Berechnung der Ausbreitungsverluste für eine Schallquelle in geeigneter Tiefe repräsentativ für ein Schiff oder eine Impulsquelle. Diese kann mit SEANAT erfolgen. Etwa 50 Positionen in Nordsee und 25 in Ostsee wären erforderlich
2. Erstellung einer Software, die aus einem gemessenen Datensatz frequenzabhängig Schiffsgeräusche und Hintergrundgeräusche unterscheiden kann
3. Erstellung einer Software, die Einzelereignisse (wie dicht vorbeifahrende Schiffe) erkennt und aus dem Datensatz isoliert
4. Erstellung einer Software, die aus dem AIS Protokoll ein Quellspektrum von Schiffen ableiten kann
5. Erstellung einer Software, die Quellpegel für Pfahlrammungen unter Berücksichtigung des jeweiligen Schallminderungssystems berechnen kann
6. Identifikation von vorhandenen Messstationen in der AWZ, die für die Platzierung eines Rekorders geeignet sind
7. Konzept zur Datenerfassung, -konzentration und Übertragung der Messdaten
8. Konzept für die Trennung von Dauergeräuschen und sich überlagernder Impulsgeräusche
9. Konzept für den Datenfluss aus vorhandenen Erfassungsstationen (AIS, ggf. Radar und andere) als Input für die Schallfeldberechnung
10. Konzept zum Abgleich der Simulation mit den Ergebnissen der stützenden Messstationen
11. Erstellung einer Simulations-Software, die für die gesamte AWZ direkt aus den AIS-Daten das Schallfeld erzeugt, Kurz- und Langzeitstatistiken erstellt und die Lage annähernd in Echtzeit darstellt, falls dies gewünscht wird.
12. Das System ist auf andere Meeresgebiete übertragbar. Ein Simulationsmodul soll vorgesehen werden.
13. Die tatsächlichen Arbeiten sind entsprechend der noch festzulegenden Zielvereinbarungen (Frequenzbereiche, betroffene Tierarten usw.) und der verfügbaren Mittel zu detaillieren.

9 Ausblick

Dieses Vorhaben konnte zeigen, dass eine Erfassung des Unterwasserschallpegels in flachen Gewässern wie den deutschen Meeresgebieten lokal, über große Gebiete und über längere Zeiträume mit überschaubarem Aufwand grundsätzlich möglich ist. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass für die Schallausbreitung bzw. für das in einiger Entfernung von der Quelle gemessene Schallfeld die Kenntnis entsprechender Umweltparameter in hinreichender Präzision erforderlich ist. Ein Abgleich zwischen Rechnung und Messung ermöglichte es innerhalb des Vorhabens, ansonsten unbekannte Umweltdaten abzuleiten, wie beispielsweise akustische Eigenschaften des Meeresbodens. Die erarbeiteten Kenntnisse und Verfahren lassen sich ohne weiteres fortschreiben, durchaus auch durch weitere Auswertungen von vorhandenen Messdaten aus anderen Vorhaben.

Weitere öffentlich geförderte Projekte, z.B. BORA, Sonic, AQUO oder Hyprowind, werden zusätzliche Erkenntnisse erbringen und zusammen mit dem hier Erarbeiteten zum besseren Verständnis der Schallausbreitung und der Ursachen beobachteter Schallpegel beitragen. Damit werden die Grundlagen verbessert, um eine adäquate biologische Bewertung der Auswirkungen von Unterwasserschall auf betroffene Tierarten vornehmen zu können.

Eine Integration der SEANAT Software in ein Monitoringsystem gemäß MSRL ist mittelfristig möglich. Dabei sollte ein Arbeitsschwerpunkt vor allem auf der Validierung der Simulationsergebnisse und Quellpegel liegen.

Literatur

- De Jong et al. (2010) Underwater noise of Trailing Suction HopperDredgers at Maasvlakte2: Analysis of source levels and background noise, TNO Report 2010 C33s
- Elmer, K.-H.; Betke, K.; Neumann, T. (2007) Abschlussbericht zum BMU-Forschungsvorhaben 0329947 - Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen SCHALL 2
- Pehlke et al (2013) Entwicklung und Erprobung des Großen Blasenschleiers zur Minderung der Hydroschallemissionen bei Offshore-Rammarbeiten, Schlussbericht Förderkennzeichen 0325309A/B/C
- Robinson, S.P.; Theobald, P. D.; Hayman, G.; Wang, L. S.; Lepper, P A; Humphrey, V.; Mumford, S.; (2011) Measurement of noise arising from marine aggregate dredging operations, MALSF (MEPF Ref no. 09/P108)
- Stokes, A.; Cockrell, K.; Wilson, J.; Davis, D.; Warwick, D. (2010) Mitigation of Underwater Pile Driving Noise During Offshore Construction: Final Report, Report Number: M09PC00019-8
- Trevorrow, M.; Vasiliev, B.; Vagle, S. (2008), Directionality and maneuvering effects on a surface ship underwater acoustic signature, J. Acoust. Soc. Am. 124 (2), August 2008, pp. 767 – 778
- Wille, P.C.; Geyer, D. (1984) Measurements on the wind-dependent ambient noise variability in shallow water, Journal of the Acoustical Society of America 75, 173 – 185.
- Wilson, P.S.; Reed, A.H.; Wood, W.; Roy, R.A. (2008) The low-frequency sound speed of fluid-like gas-bearing sediments, J. Acoust. Soc. Am. 123 (4), April 2008