Moritz Fricke, Ole Ehrt, Wassim Hayek, Christina Müller-Blenkle, Klaus Betke, Rainer Matuschek, Joachim Gabriel, Andrea Lübben

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

# Erforschung von Sonartranspondern für Offshore-Windparks und technische Integration in ein Gesamtkonzept

Verbundpartner (Teil A) und Projektleitung:

Institut für Statik und Dynamik (ISD)

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes Institut für Statik und Dynamik Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Postfach 6009 D-30060 Hannover



#### Verbundpartner (Teil B):

THALES Instruments GmbH

Dipl.-Phys. Jens Krieger THALES Instruments GmbH Werftweg 15 D- 26135 Oldenburg



#### Angaben zum Projekt:

Projektlaufzeiten:

Berichtszeitraum:

Förderkennzeichen:

Teil A: 01.02.2009- 31.03.2011 Teil B: 01.02.2009 - 31.01.2011 01.02.2009 - 31.03.2011

Teil A: 0325104A Teil B: 0325104B

# Auftragnehmer

Deutsches Windenergie-Institut GmbH (DEWI) Ebertstr. 96. D-26382 Wilhelmshaven

Institut für technische und angewandte Physik GmbH (ITAP), Marie-Curie-Str. 8, D-26129 Oldenburg

BioConsult SH GmbH & Co. KG (BioConsult) Brinckmannstr. 31, D-25813 Husum







# Projektförderer / Projektträger

Das diesem Bericht zugrundeliegende Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0325104A/B und unter der Trägerschaft des Projektträgers Jülich gefördert. Die Verantwortung für die Inhalte des Abschlussberichts liegt bei den jeweils genannten Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

# Vorwort

Wir möchten uns an dieser Stelle bei den Mitarbeitern vom ITAP, vom DEWI und der Fa. BioConsult SH sowie der Fa. THALES Instruments für die gute Zusammenarbeit im Vorhaben herzlich bedanken. Weiter gilt unser ausdrücklicher Dank der Deutschen Offshore-Testfeld und Infrastruktur GmbH & Co. KG (DOTI) für den reibungslosen Ablauf der Installationsarbeiten und Messkampagnen im Offshore-Testfeld *alpha ventus*.

Nicht zuletzt gilt unser Dank dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit für die finanzielle Förderung sowie dem Projektträger Jülich für die intensive Unterstützung und Projektbegleitung.

Hannover, September 2011

Dipl.-Ing. Moritz Fricke

Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes

### Abstract

#### by Moritz Fricke (ISD)

The present report deals with the results of the research project "Investigation of Sonar Transponders for Offshore Wind Farms and Technical Integration to an Overall Concept". The main aim of this project was the development of an ecologically sensitive and technically matured sonar transponder system to prevent submarines from collisions with offshore wind farms. Whenever man-made sound is induced to the underwater environment, the impact on marine mammals has to be taken into account as these animals use underwater sound for orientation and localization of prey. On the other hand the acoustic source power of the transponder has to be high enough in order to assure a sufficient signal-to-noise ratio and a certain operation distance of the sonar transponder even under bad conditions. Therefor two different prototypes of sonar transponders have been developed, tested and evaluated with respect to their impact on marine mammals. The project was funded by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety.

Chapter 2 deals with the developed transponder systems in terms of device technology. The second transponder system, namely the THALES WISO ST01, complies with the specifications that were worked out in (Nissen 2004). The reengineered transducer comes with a source level of approximately 198 dB re  $1\mu$ Pa @ 1m. As the directivity of the single transducer does not reach 180°, the control unit was extended by the capability of driving up to four transducers in order to cover even strongly convex vertices of a wind farm. Thus, the second prototype can be used as a basis for a commercial application.

Chapter 3 gives a background of shallow water sound propagation and describes the implementation of a hybrid approach for the simulation of the directionality and operating distance of the transponder signal. Moreover, Chapter 3 gives the basis for a proper choice of measuring points during the measuring campaigns. The obtained simulation results show a significant correlation between the considered weather condition and the transmission loss of the transponder signal. Based on the results it can be emphasized that a source level of approximately 200 dB re  $1\mu$ Pa @ 1m is required to guarantee for an operating distance of 2 NM even under bad weather conditions.

Chapter 4 deals with the two field campaigns that were carried out during the project to determine the range-dependent transmission loss under different weather conditions. The measurements were conducted at the test site *alpha ventus* where the two transponder systems have been mounted at the wind energy converters AV10 and AV12. The results show that the transmission loss intensively increases with increasing wind speed and wave heights. Although no measurements could be arranged under worst-case weather conditions ( $v_{wind} = 15 \text{ m/s}$ ,  $H_s = 1,5 \text{ m}$ , see (Nissen 2004)), it was extrapolated from the achieved results that a transmission loss of 100 dB at a distance 2 NM is of realistic magnitude considering the worst-case conditions. Again the required source level of approximately 200 dB re 1µPa @ 1m is emphasized. The results of further experiments show that the second transponder system satisfies the criterion of activatability while being immune to acoustic noise.

Chapter 5 treats of the biological evaluation of the transponder signal with respect to marine mammals. It is derived from the measurement results that a hearing threshold shift concerning porpoises and seals is unlikely. The major effects on these animals will be deterrence, changed behaviour and stress. As the activation of sonar transponders at offshore wind energy farms will only occur rarely, no significant impact on marine mammals is expected. Nevertheless any other application accompanying continuous or regular activations of the sonar transponder requires a biological re-evaluation.

## Zusammenfassung

#### von Moritz Fricke (ISD)

Der vorliegende Bericht bildet den Abschluss des Forschungsvorhabens "Erforschung von Sonartranspondern für Offshore-Windparks und technische Integration in ein Gesamtkonzept". Das Hauptziel des die Entwicklung eines umweltverträglichen und technisch Vorhabens war ausgereiften Sonartranspondersystems. Sonartransponder erfüllen die Aufgabe, durch ein von der Gründungskonstruktion einer Windenergieanlage gesendetes Unterwasser-Schallsignal eine Kollision zwischen einem getauchten Unterwasserfahrzeug und der Windenergieanlage zu vermeiden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass anthropogene Schalleinträge in den Wasserkörper negative Auswirkungen auf marine Säugetiere wie Schweinswale und Seehunde haben können. Aus biologischer Sicht ist es daher angezeigt, die Intensität und Dauer von Schallereignissen gering zu halten. Um jedoch eine gewisse Reichweite des Transpondersignals auch unter hydroakustisch ungünstigen Wetterbedingungen zu erzielen, muss der Transponder über einen ausreichend hohen Quellpegel verfügen. Um diesen gegensätzlichen Anforderungen gerecht zu werden, wurden im Rahmen des Vorhabens zwei unterschiedliche prototypische Sonartranspondersysteme entwickelt, getestet und hinsichtlich negativer biologischer Einflüsse untersucht. Um die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Signalreichweite zu identifizieren, wurde ein Berechnungsmodell für die Ausbreitung des Transpondersignals implementiert. Das Forschungsvorhaben wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

Die von der Forschungsanstalt für Wasserschall und Geophysik<sup>1</sup> formulierten Anforderungen an die akustische Kenntlichmachung von Offshore-Windparks (Nissen 2004) konnten mit der Entwicklung des zweiten Prototyps erfüllt werden. Mit dem gegenüber dem ersten Prototyp überarbeiteten Schallwandler konnte ein Quellpegel von 198 dB re 1µPa in 1m erreicht werden. Um schwerwiegende negative Auswirkungen auf marine Säugetiere zu vermeiden, besitzt das System eine Soft-Start-Funktion, um eine Vergrämung der Tiere aus dem Gefahrenbereich zu erreichen, bevor der Maximalpegel erreicht wird.

Die auf der Grundlage der Kenndaten des zweiten Prototyps durchgeführten Simulationen zur Schallausbreitung zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus (Nissen 2004). Die simulierten Ausbreitungsverluste zeigen eine große Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe. Unter den in (Nissen 2004) getroffenen Annahmen für den Störgeräuschpegel im betrachteten Frequenzbereich bestätigen die in diesem Vorhaben erzielten Simulationsergebnisse, dass für eine sichere Detektion des Transpondersignals in einer Entfernung von 2 NM (nautische Meilen) unter ungünstigen Wetterbedingungen ein Quellpegel von ca. 200 dB re 1µPa in 1m erforderlich ist.

Zur Bestimmung der Ausbreitungsverluste unter unterschiedlichen Wetterbedingungen wurden im Rahmen des Vorhabensteils A zwei Messkampagnen (bei gutem Wetter im Oktober 2010 und bei schlechtem Wetter im Februar 2011) im Testfeld *alpha ventus* durchgeführt. In Entfernungen von mehr als 2 km wird unter schlechten Wetterbedingungen die erheblich stärkere Dämpfung durch den Eintrag von Luftblasen in die Wasseroberfläche deutlich. Eine Messung unter den in (Nissen 2004) angegebenen kritischen Bedingungen ( $v_{wind} = 15$  m/s und  $H_s = 1,5$  m) konnte leider nicht realisiert werden. Die Extrapolation der Ergebnisse der zweiten Messkampagne auf diese Wetterbedingungen anhand des erstellten Simulationsmodells zeigt jedoch, dass der Ausbreitungsverlust in 2 NM mit ca. 100 dB anzunehmen ist. Die Messergebnisse unterstreichen daher die Forderung nach einem Quellpegel von etwa 200 dB re 1µPa in 1m aus (Nissen 2004).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> seit 01.02.2009: Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik der Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen der Bundeswehr, Maritime Technologie und Forschung (WTD71)

Die auf der Basis der Messergebnisse durchgeführten biologischen Untersuchungen zeigen, dass nicht mit einer Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen und Seehunden aufgrund des Transpondersignals zu rechnen ist. Die wesentlichen Effekte von Sonartranspondern auf Schweinswale und Seehunde sind Vergrämung, Verhaltensänderungen und Stress. Für Schweinswale wird unter guten Wetter- und Schallausbreitungsbedingungen eine Vergrämung bis zu 7 km und Verhaltensänderungen bis zu 10 km erwartet. Für Seehunde werden Vergrämung bis zu 2 km, deutliche Verhaltensänderungen bis in eine Entfernung von 4 km und leichte Verhaltensänderungen bis hin zu 6 km erwartet. Aufgrund der nur seltenen Aktivierung von Sonartransponder ist mit keiner wesentlichen Beeinflussung von marinen Säugetieren zu rechnen. Eine andauernde oder regelmäßige Nutzung der Sonartransponder erfordert jedoch eine biologische Neubewertung der Situation.

# Inhaltsverzeichnis

| 1 | Einle | eitung,                     | Zusammenfassung und Ausblick  | 1  |  |  |  |  |  |
|---|-------|-----------------------------|---|----|--|--|--|--|--|
|   | 1.1   | Einle                       | itung   | 1  |  |  |  |  |  |
|   | 1.2   | Zusammenarbeit im Vorhaben2 |   |    |  |  |  |  |  |
|   | 1.3   | Zusammenfassung3            |   |    |  |  |  |  |  |
|   | 1.4   | Ausb                        | lick  | 4  |  |  |  |  |  |
| 2 | Entv  | vicklun                     | g des Transpondersystems (FKZ 0325104B)   | 6  |  |  |  |  |  |
|   | 2.1   | Stand                       | l der Technik bei Vorhabensbeginn   | 6  |  |  |  |  |  |
|   | 2.2   | Tech                        | nische Anforderungen  | 6  |  |  |  |  |  |
|   | 2.3   | Syste                       | marchitektur des Transpondersystems   | 7  |  |  |  |  |  |
|   | 2.4   | Entw                        | icklung von Steuergerät und Schallwandler   | 10 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.4.1                       | Entwicklung der Hardware und Implementierung der<br>Signalverarbeitungsroutinen für das Steuergerät | 10 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.4.2                       | Realisierung der Selbsttest- und Protokollfunktionen  | 15 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.4.3                       | Entwicklung des Schallwandlers  | 17 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.4.4                       | Überführung des Prototypen zur Serienreife  | 19 |  |  |  |  |  |
|   | 2.5   | Mess                        | technische Überprüfung der Transponderspezifikationen   | 21 |  |  |  |  |  |
|   | 2.6   | Instal                      | llation der Transponder im Testfeld <i>alpha ventus</i>   | 22 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.6.1                       | Onshore-Installation des Transponders an AV10   | 22 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.6.2                       | Offshore-Installation des Transponders an AV12  | 24 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.6.3                       | Installation der Remote-Verbindungen  | 25 |  |  |  |  |  |
|   |       | 2.6.4                       | Empfehlungen zur Installation   | 26 |  |  |  |  |  |
|   | 2.7   | Wart                        | ung der Schallwandler   | 26 |  |  |  |  |  |
|   | 2.8   | Zusai                       | nmenfassung und Diskussion  |    |  |  |  |  |  |
| 3 | Akus  | stische                     | Modellbildung und Simulation (FKZ 0325104A)   |    |  |  |  |  |  |
|   | 3.1   | Einfü                       | hrung   | 28 |  |  |  |  |  |
|   | 3.2   | Theorem                     | retische Grundlagen   | 28 |  |  |  |  |  |
|   |       | 3.2.1                       | Akustische Einflussgrößen und ihre Abbildung im Modell  | 28 |  |  |  |  |  |
|   |       |                             | 3.2.1.1 Impedanz und Intensität   | 28 |  |  |  |  |  |
|   |       |                             | 3.2.1.3 Beugung   | 29 |  |  |  |  |  |
|   |       |                             | 3.2.1.4 Brechung  | 30 |  |  |  |  |  |
|   |       |                             | 3.2.1.5 Streuung  | 31 |  |  |  |  |  |
|   |       | 3 7 7                       | S.2.1.0 Absolption  | 52 |  |  |  |  |  |
|   |       | 3.2.2                       | Schandostrannung und -empräng elektroakustischer Wahuler  | 55 |  |  |  |  |  |
|   | 22    | J.Z.J<br>Mode               | Soliai-Olechungen   | 54 |  |  |  |  |  |
|   | 5.5   | 331                         | Randelemente-Methode  |    |  |  |  |  |  |
|   |       | 337                         | Rav-Tracing   | 36 |  |  |  |  |  |
|   | 3.4   | Simu                        | lationsergebnisse zur Schallabstrahlung der Wandler   |    |  |  |  |  |  |
|   |       | 3.4.1                       | Freie Schallabstrahlung der Wandler   |    |  |  |  |  |  |
|   |       | 342                         | Schallabstrahlung der installierten Wandler   |    |  |  |  |  |  |
|   |       | 5.7.2                       | Senanuestannung der mounteren in under  |    |  |  |  |  |  |

|   | 3.5 | Simul   | ationsergebnisse zu den Übertragungsverlusten                | 40 |  |  |  |  |
|---|-----|---|--|----|--|--|--|--|
|   | 3.6 | Disku   | ssion der Simulationsergebnisse                              |    |  |  |  |  |
| 4 | Hyd | roakust   | ische Messungen (FKZ 0325104A)                               | 44 |  |  |  |  |
|   | 4.1 | Einfül  | nrung  | 44 |  |  |  |  |
|   | 4.2 | Messa   | ufbau und Methodik   | 44 |  |  |  |  |
|   |     | 4.2.1   | Eingesetzte Messtechnik                                      | 44 |  |  |  |  |
|   |     | 4.2.2   | Lage der Messpunkte  | 45 |  |  |  |  |
|   |     | 4.2.3   | Umgebungsbedingungen   | 46 |  |  |  |  |
|   |     | 4.2.4   | Methodik der Datenauswertung                                 |    |  |  |  |  |
|   | 4.3 | Richtu  | ıngsabhängigkeit des Schallfeldes                            |    |  |  |  |  |
|   | 4.4 | Übert   | ragungsverluste  | 50 |  |  |  |  |
|   | 4.5 | Aktivi  | erungstest   |    |  |  |  |  |
|   |     | 4.5.1   | Methode  |    |  |  |  |  |
|   |     | 4.5.2   | Bestimmung des Sende- und Empfangspegels                     | 55 |  |  |  |  |
|   |     | 4.5.3   | Ergebnisse   | 56 |  |  |  |  |
|   |     | 4.5.4   | Zusammenfassung und kurze Diskussion der Ergebnisse          | 59 |  |  |  |  |
|   | 4.6 | Zeitlic   | he Varianz des Ausbreitungspfades                            | 59 |  |  |  |  |
|   |     | 4.6.1   | Messmethode  | 59 |  |  |  |  |
|   |     | 4.6.2   | Ergebnisse   | 61 |  |  |  |  |
|   |     | 4.6.3   | Diskussion der Ergebnisse                                    | 65 |  |  |  |  |
|   | 4.7 | Überl   | agerungseffekte  | 67 |  |  |  |  |
|   | 4.8 | Vergle  | eich mit Simulationsergebnissen                              | 69 |  |  |  |  |
|   | 4.9 | Disku   | ssion und Schlussfolgerungen                                 | 70 |  |  |  |  |
| 5 | Öko | logische  | Bewertung (FKZ 0325104A)                                     | 71 |  |  |  |  |
|   | 5.1 | Einlei  | tung und Fragestellung                                       | 71 |  |  |  |  |
|   | 5.2 | Akust   | ische Eigenschaften der Sonartransponder                     | 71 |  |  |  |  |
|   | 5.3 | Biolog  | ische Relevanz von Schall für marine Säugetiere              | 72 |  |  |  |  |
|   |     | 5.3.1   | Hörfähigkeit und Kommunikation bei Schweinswalen             | 73 |  |  |  |  |
|   |     |   | 5.3.1.1 Echolokation   | 74 |  |  |  |  |
|   |     | 520   | 5.5.1.2 Kommunikation  |    |  |  |  |  |
|   |     | 5.5.2   | 5.3.2.1 Kommunikation  |    |  |  |  |  |
|   |     | 5.3.3   | Auswirkungen von Schall auf marine Säugetiere                | 77 |  |  |  |  |
|   |     |   | 5.3.3.1 Physiologische Schäden                               | 78 |  |  |  |  |
|   |     |   | 5.3.3.2 Vorübergehende Hörschwellenverschiebungen            | 79 |  |  |  |  |
|   |     |   | 5.3.3.4 Maskierung biologisch relevanter akustischer Signale |    |  |  |  |  |
|   |     |   | 5.3.3.5 Stress   |    |  |  |  |  |
|   |     |   | 5.3.3.6 Habituation  |    |  |  |  |  |
|   | 5.4 | 5.4 Einschätzung möglicher Effekte von Sonartranspondern auf marine |  |    |  |  |  |  |
|   |     | Sauge   | Alaustische Vergrömer (Dinger und seel seerer)               |    |  |  |  |  |
|   |     | J.4.1   | 5.4.1.1 Pinger   |    |  |  |  |  |
|   |     |   | 5.4.1.2 Seal scarer  |    |  |  |  |  |

|      | 5.4.2 Mögliche Effekte von Sonartranspondern   |   |
|------|--|---|
|      | 5.4.2.1 Hörschäden   |   |
|      | 5.4.2.2 Verhaltensreaktionen   |   |
|      | 5.4.2.3 Maskierung biologisch relevanter Signale   |   |
|      | 5.4.3 Vorschläge zur Minimierung von Auswirkungen auf marine Säugetiere  | 90  |
| 5.5  | Schlussfolgerungen   | 90  |
| Emp  | fehlungen für die Anordnung, die Installation und den Betrieb von  |   |
| Sona | rtranspondern an Offshore-Windenergieanlagen (FKZ0325104A/B)   | 92  |
| 6.1  | Installation und Wartung   | 92  |
| 6.2  | Anordnung der Transponder  | 92  |
|      | 6.2.1 Beispielanordnung A: Gerade Windpark-Kante   | 93  |
|      | 6.2.2 Beispielanordnung B: Spitze Windpark-Ecke  | 93  |
|      | 6.2.3 Beispielanordnung C: Stumpfe Windpark-Ecke   | 94  |
|      | 6.2.4 Beispielanordnung D: Rechtwinklige Windpark-Ecke   | 95  |
| 6.3  | Sicherheitsrelevante und ökologische Aspekte   | 96  |
| Lite | aturverzeichnis  | 97  |
| Anh  | ang  |   |
| A.1  | Wetterverhältnisse während der Messkampagnen   | 104   |
| A.2  | Messpositionen und Positionierungsgenauigkeit  | 105   |
| A.3  | Spektrogramme der gemessenen Sendesequenzen  |   |
|      | <ul> <li>5.5</li> <li>Emp Sona</li> <li>6.1</li> <li>6.2</li> <li>6.3</li> <li>Liter</li> <li>Anha</li> <li>A.1</li> <li>A.2</li> <li>A.3</li> </ul> | <ul> <li>5.4.2 Mögliche Effekte von Sonartranspondern</li></ul> |

# Abbildungsverzeichnis

| Abb. 1: Systemübersicht des ersten Prototyps   | 9  |
|--|----|
| Abb. 2: Systemübersicht des zweiten Prototyps  | 10 |
| Abb. 3: Das Steuergerät THALES WISO ST-01  | 11 |
| Abb. 4: Flussdiagramm THALES WISO ST-01  | 12 |
| Abb. 5: Blockdiagramm Prototyp 1   | 13 |
| Abb. 6: Blockdiagramm Prototyp 2   | 14 |
| Abb. 7: Schallwandler des 200dB Systems  | 18 |
| Abb. 8: Messtechnische Überprüfung der Spezifikation (Quelle: (WTD71 2010)   | 21 |
| Abb. 9: Installierter Schallwandler an AV 10   | 22 |
| Abb. 10: Querschnitt durch Tripod unterhalb Standort Steuergerät auf P9  | 23 |
| Abb. 11: Steuergerät Prototyp im Schaltschrank   | 23 |
| Abb. 12: Montage des Schallwandlers mit Montageplatte an vorbereiteten Halterungen   | 24 |
| Abb. 13: Installiertes Steuergerät auf AV 12   | 25 |
| Abb. 14: Reflexion und Brechung an einer Grenzschicht  | 30 |
| Abb. 15: Angenommene saisonale Schallgeschwindigkeitsprofile (Quelle: )  | 31 |
| Abb. 16: Relative Streucharakteristik für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten (Berechnung nach (Brekhovskikh und Lysanov 1982))                                   | 32 |
| Abb. 17: Tiefenabhängiger Absorptionskoeffizient infolge Blaseneintrag   | 33 |
| Abb. 18: Richtcharakteristik einer kreisförmigen Kolbenmembran für ka=0.110  | 34 |
| Abb. 19: Vereinfachter Programmablaufplan eines Ray-Tracing-Algorithmus (nach (Vorländer 2008))  | 36 |
| Abb. 20: Abbildung von Schallwandler und Tripod im BEM-Modell; (a) Installierter   |    |
| Schallwandler an AV10; (b) Tripod-Ausschnitt mit Schallwandler und Symmetrie-Ebene   | 37 |
| Abb. 21: Horizontale und vertikale Richtcharakteristiken der unterschiedlichen Wandlertypen  | 38 |
| Abb. 22: Horizontale Richtcharakteristiken der unterschiedlichen Wandlertypen  | 39 |
| Abb. 23: Vergleich der Richtcharateristiken bei freier Abstrahlung und bei Abstrahlung der an<br>den unterschiedlichen Gründungskonstruktionen installierten Wandler | 40 |
| Abb. 24: Vergleich der simulierten Übertragungsverluste mit Ergebnissen aus (Nissen 2004) für<br>unterschiedliche Schallgeschwindigkeitsprofile.                     | 41 |
| Abb. 25: Vergleich der simulierten Übertragungsverluste mit den Ergebnissen aus (Nissen 2004) für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten                             | 41 |
| Abb. 26: Horizontale und vertikale Schnitte zur Darstellung der Übertragungsverluste. Oben:<br>Oktober, v_wind=2m/s; Unten: Oktober, v_wind=15m/s                    | 42 |
| Abb. 27: Eingesetztes Hydrofon   | 45 |
| Abb. 28: Lage der Messpunkte im Testfeld alpha ventus  | 46 |
| Abb. 29: Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen während der Messkampagnen (Quelle: FINO1-Datenbank/BMU)  | 47 |
| Abb. 30: Während der beiden Messkampagnen gemessene Schallgeschwindigkeitsprofile  | 48 |

| Abb. 31: Spektrogramme und extrahierte Pegelverläufe; links: Entfernung: 3793m, Winkel zur<br>Hauptabstrahlrichtung: 1°, Messkampagne 10/2010; rechts: Entfernung: 3796m, Winkel<br>zur Hauptabstrahlrichtung: 2°, Messkampagne 02/2011                    | 49  |
|--|-----|
| Abb. 32: Winkelabhängige Pegeldifferenz relativ zur Hauptabstrahlrichtung  | 50  |
| Abb. 33: In Hauptabstrahlrichtung gemessene Übertragungsverluste für unterschiedliche Wetterbedingungen  | 51  |
| Abb. 34: Vergleich der gemessenen entfernungsabhängigen Signalpegel für die Transponder an AV10 und AV12. Die Messungen erfolgen jeweils in Hauptabstrahlrichtung  | 51  |
| Abb. 35: Schematische Darstellung der Testmethode vor Ort. Der Sendewandler ("Transducer")<br>und das Hydrofon wurden an gegenüberliegenden Seiten der MS Emswind ausgebracht<br>und befanden sich rund 10 m unter der Wasseroberfläche                    | 53  |
| Abb. 36: Sendewandler mit Ballastgewicht   | 54  |
| Abb. 37: Geräte an Bord der Emswind  | 54  |
| Abb. 38: Mit einem Ravtracing-Programm für verschiedene Bedingungen berechnete   |     |
| Ausbreitungsdämpfung (Nissen 2004) im Vergleich zur Ausbreitungsdämpfung nach<br>Thiele (Thiele und Schellstede 1980)  | 55  |
| Abb. 39: Sendeempfindlichkeit des benutzten Wandlers ITC-1001. Bei 8 kHz beträgt sie 132 dB re 1µPa m/V.   | 56  |
| Abb. 40: Schallmessboje. Das Hydrofon befand sich etwa 2 m über dem Meeresboden  | 60  |
| Abb. 41: Lage der Messbojen  | 60  |
| Abb. 42: Beispiele für Zeitfunktionen des Transpondersignals an den vier Messpositionen (L und Q am 12.10.2010, R und V am 23.02.2011. Boje L, Q und R lgen bei AV12, V bei AV10)  | 62  |
| <ul> <li>Abb. 43: Beispiele f ür den Pegelverlauf (Leq  über jeweils 0.25 s) an Messposition L am<br/>12.10.2010. Dargestellt ist der Beginn einer 5-min ütigen Sendephase des Transponders mit<br/>dem stufenweisen Anstieg der Sendeleistung.</li> </ul> | 63  |
| Abb. 44: Ausschnitt aus Abb. 43  | 63  |
| Abb. 45: Zeitliche Pegelverläufe für die gesamten Messzeiträume. Jeder Datenpunkt stellt den Leq über die letzten 3 Minuten der 5-minütigen Aussendung des Transponders dar  | 64  |
| Abb. 46: Häufigkeitsverteilung der 0.25-Sekunden-Pegelwerte an den vier Messpunkten  | 64  |
| Abb. 47: Mit FFP-Verfahren berechnete Ausbreitungsdämpfung für eine Frequenz von 8 kHz und<br>eine Wasser¬tiefe von 29 m. Zum Vergleich ist die Ausbreitungsdämpfung eingezeichnet,<br>die sich nach der Formel nach (Thiele und Schellstede 1080) ersibt  | 66  |
| Abb. 48: Mit FFP-Verfahren berechnete Ausbreitungsdämpfung für zwei Entfernungsbereiche für<br>eine Wassertiefe von 29 m (Ausschnitte aus Abb. 47) und für 30 m  | 66  |
| Abb. 49: Geografische Lage von Sonartranspondern (AV10 und AV12) und Messpositionen (bunt) während der Vermessung von Überlagerungseffekten  | 67  |
| Abb. 50: Spektrogramm für die Zeit der Überlagerung der Sonarsignale   | 68  |
| Abb. 51: Schmalbandspektrum für die Überlagerung der Sonartransponder Signale von AV10   | (0) |
| Abb. 52: Vergleich der gemessenen Übertragungsverluste mit Simulationsergebnissen;   | 69  |
| Extrapolation auf v_wind=15m/s anhand des entwickelten Simulationsmodells  | 70  |

| Abb. 53: Spektrogramm der Messung an Messpunkt A05 in 522 m Entfernung vom   |   |
|--|---|
| Sonartransponder. Die Messung erfolgte während der 2. Messkampagne unter relativ schlechten Wetterbedingungen7   | 2 |
| Abb. 54: Audiogramme von Schweinswalen ermittelt durch Verhaltensstudien (V) ((Andersen  |   |
| 1970), (Kastelein u. a. 2002)) und Hirnstammaudiometrie (HS) ((Lucke u. a. 2004), (Lucke   |   |
| u. a. 2006), (Popov u. a. 2006))   | 4 |
| Abb. 55: Audiogramme zweier Seehunde nach (Kastelein u. a. 2009)   | 7 |
| Abb. 56: Beispielhafte Anordnung der Sonartransponder an einer geraden Windpark-Kante; links:<br>Transponderabstand = 1,5NM; rechts: Transponderabstand = 2NM  | 3 |
| Abb. 57: Beispielhafte Anordnung der Sonartransponder an einer spitzen Windpark-Ecke; links:<br>Anordnung mit zwei Schallwandlern an der Windparks-Ecke; rechts: Anordnung mit<br>einem Schallwandler an der Windpark-Ecke | 4 |
| Abb. 58: Beispielhafte Anordnung der Sonartransponder an einer stumpfen Windpark-Ecke;   |   |
| links: Anordnung mit einem Sonartransponder an der Windparks-Ecke; rechts: Beinahe   |   |
| vollständige Abdeckung der Sicherheitszone durch benachbarte Sonartransponder9   | 5 |
| Abb. 59: Beispielhafte Anordnung der Sonartransponder an einer rechtwinkligen Windpark-Ecke;   |   |
| links: Anordnung mit zwei Schallwandlern an der Windparks-Ecke; rechts: Anordnung  |   |
| mit einem Schallwandler an der Windparkecke9   | 5 |
| Abb. 60: Aufnahmen der Wasseroberfläche zur Veranschaulichung des Seegangszustandes  |   |
| während der beiden Messkampagnen; links: 1. Messkampagne, aufgenommen am   |   |
| 13.10.2010; rechts: 2. Messkampagne, aufgenommen am 24.02.2011   | 4 |
| Abb. 61: Kartendarstellung der Zielpositionen und der tatsächlichen mittleren Messposition   |   |
| während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV12 während der Messkämpagne   | 0 |
|  | 0 |
| Abb. 62: Kartendarstellung der Zielpositionen und der tatsachlichen mittleren Messposition   |   |
| wallend der Vermessung der Obertragungsverfuste an $A \sqrt{12}$ wallend der Messkampagne  | 8 |
| Abb. 62: Vortenderstellung der Zielnesitionen und der tetsächlichen mittleren Messnesition   | 0 |
| während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV10 während der Messkampagne   |   |
| 02/2011  | 9 |
| Abb. 64: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen: Messnunkt A01: Messkampagne 10/2010 11  | 0 |
| Abb 65: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen: Messpunkt A02: Messkampagne 10/2010 11   | 0 |
| Abb. 66: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A02; Messkampagne 10/2010 11  | 0 |
| Abb. 60. Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen, Messpunkt A04, Messkampagne 10/2010 11  | 0 |
| Abb. 67: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A04; Messkampagne 10/2010 11  | 1 |
| Abb. 68: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A05; Messkampagne 10/2010 11  | 1 |
| Abb. 69: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A07; Messkampagne 10/201011   | 1 |
| Abb. 70: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A08; Messkampagne 10/201011   | 1 |
| Abb. 71: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A09; Messkampagne 10/2010 11  | 1 |
| Abb. 72: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A10; Messkampagne 10/201011   | 2 |
| Abb. 73: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A12; Messkampagne 10/201011   | 2 |
| Abb. 74: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A13; Messkampagne 10/201011   | 2 |
| Abb. 75: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A14; Messkampagne 10/2010 11  | 2 |

Abb. 76: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A15; Messkampagne 10/2010...... 113 Abb. 77: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A16; Messkampagne 10/2010...... 113 Abb. 78: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A17; Messkampagne 10/2010......113 Abb. 79: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A18; Messkampagne 10/2010......113 Abb. 80: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A19; Messkampagne 12/2010......114 Abb. 81: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A20; Messkampagne 12/2010...... 114 Abb. 82: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A21; Messkampagne 10/2010......114 Abb. 83: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A22; Messkampagne 10/2010...... 114 Abb. 84: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A23; Messkampagne 10/2010......115 Abb. 85: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A24: Messkampagne 10/2010...... 115 Abb. 86: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A25; Messkampagne 10/2010...... 115 Abb. 87: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A05; Messkampagne 02/2011......116 Abb. 88: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A07; Messkampagne 02/2011......116 Abb. 89: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A08; Messkampagne 02/2011......116 Abb. 90: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A09; Messkampagne 02/2011......116 Abb. 91: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A10; Messkampagne 02/2011...... 117 Abb. 92: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A12; Messkampagne 02/2011...... 117 Abb. 93: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A12; Messkampagne 02/2011......117 Abb. 94: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A13; Messkampagne 02/2011...... 117 Abb. 95: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A15; Messkampagne 02/2011...... 118 Abb. 96: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A16; Messkampagne 02/2011......118 Abb. 97: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A17; Messkampagne 02/2011...... 118 Abb. 98: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A18; Messkampagne 02/2011...... 118 Abb. 99: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A19; Messkampagne 02/2011......119 Abb. 100: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A20; Messkampagne 02/2011.....119 Abb. 101: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A21; Messkampagne 02/2011.....119 Abb. 102: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A22; Messkampagne 02/2011.....119 Abb. 103: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A23; Messkampagne 02/2011.....120 Abb. 104: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A24; Messkampagne 02/2011.....120 Abb. 105: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A25; Messkampagne 02/2011.....120 Abb. 106: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B06; Messkampagne 02/2011 ..... 121 Abb. 107: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B07; Messkampagne 02/2011 ..... 121 Abb. 108: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B08; Messkampagne 02/2011 ..... 121 Abb. 109: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B09; Messkampagne 02/2011 ..... 121 Abb. 110: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B10; Messkampagne 02/2011 ..... 122 Abb. 111: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B11; Messkampagne 02/2011 ..... 122 Abb. 112: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B12; Messkampagne 02/2011 ..... 122 Abb. 113: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B13; Messkampagne 02/2011 ..... 122 Abb. 114: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B1; Messkampagne 02/2011 ...... 123 Abb. 115: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B15; Messkampagne 02/2011 ..... 123
Abb. 116: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B16; Messkampagne 02/2011 ..... 123
Abb. 117: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B17; Messkampagne 02/2011 ..... 123
Abb. 118: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B18; Messkampagne 02/2011 ..... 124
Abb. 119: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B19; Messkampagne 02/2011 ..... 124
Abb. 120: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B20; Messkampagne 02/2011 ..... 124

# Tabellenverzeichnis

| Tab. 1: Beschreibung potentialfreie Ein- und Ausgänge  | 8    |
|--|------|
| Tab. 2: Technische Spezifikationen Steuergerät   | . 14 |
| Tab. 3: Technische Spezifikationen Leistungsverstärker   | . 15 |
| Tab. 4: Beispiele für die Dateien system.log und sysnoise.log  | . 17 |
| Tab. 5: Technische Spezifikationen Schallwandler   | . 19 |
| Tab. 6: Kennwerte f         ür verschiedenen Sedimentarten f         ür kontinentale Randmeere (Quelle: (Urban 2002))  | .29  |
| Tab. 7: Eingesetzte Messgeräte   | .44  |
| Tab. 8: Eingesetzte Geräte an Bord der Emswind   | .53  |
| Tab. 9: Aktivierungsversuche auf der Bandmittenfrequenz  | .56  |
| Tab. 10: Aktivierungsversuche an den Bandgrenzen   | . 57 |
| Tab. 11: Aktivierungsversuche mit verkürzter Tondauer  | .58  |
| Tab. 12: Aktivierungsversuche mit Rauschsignalen. Die Zahlen in Klammern geben den Pegel<br>des Anteils des Rauschsignals an, der innerhalb des Aktivierungsfrequenzbands 8080 Hz<br>bis 8150 Hz liegt.  | .58  |
| Tab. 13: Positionen der autonomen Aufzeichnungsgeräte (Messbojen)  | .61  |
| Tab. 14: Eingesetzte Geräte  | .61  |
| Tab. 15: Ergebnisse der hydroakustischen Messungen in unterschiedlichen Entfernungen vom      Sonartransponder   | . 87 |
| Tab. 16: Einschätzung der Entfernung, in der Auswirkungen von Sonartranspondern auf         Schweinswale und Robben auf der Basis der Messwerte zu erwarten sind   | . 89 |
| Tab. 17: Zielpositionen und tatsächliche mittlere Messposition während der Vermessung der<br>Übertragungsverluste an AV12 während der Messkampagne 10/2010; Aus<br>Sicherheitsgründen nicht angefahrerene Positionen sind durch "" gekennzeichnet              | 105  |
| Tab. 18: Zielpositionen und tatsächliche mittlere Messposition während der Vermessung der<br>Übertragungsverluste an AV12 während der Messkampagne 02/2011; Aus<br>Sicherheitsgründen nicht angefahrerene Positionen sind durch "" gekennzeichnet              | 106  |
| Tab. 19: Zielpositionen und tatsächliche mittlere Messposition während der Vermessung der<br>Übertragungsverluste an AV10 während der Messkampagne 02/2011; "": Aus<br>Sicherheitsgründen ausgelassene Pos.; "xx" Aufgrund zu geringer Pegel ausgelassene Pos1 | 107  |

# 1 Einleitung, Zusammenfassung und Ausblick

#### 1.1 Einleitung

#### von Moritz Fricke (ISD)

Die Nutzung der Windenergie gewinnt in Deutschland mit der Realisierung einer stetig zunehmenden Anzahl von Windparks auf See an Bedeutung. Neben der Nutzung durch die zivile Schifffahrt und die Fischerei unterliegt die deutsche Ausschließliche Wirtschaftzone einer steigenden konkurrierenden Nutzung zwischen Windenergie-Industrie und Bundesmarine. Offshore-Windenergieanlagen stellen für getauchte Unterwasserfahrzeuge künstliche Gefahrenquellen dar, zumal unter Wasser die Nutzung von RADAR-Systemen zur Navigation nicht möglich ist. Daher erfordern Offshore-Windenergieanlagen eine akustische Kenntlichmachung für U-Boote, um mithilfe von SONAR-Verfahren (<u>So</u>und <u>N</u>avigation <u>And R</u>anging) eine Kollision zu vermeiden.

Die Spezifikation einer derartigen Kenntlichmachung erfolgte durch die Bundesmarine in Zusammenarbeit mit der Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik (FWG)<sup>2</sup>. Gerätetechnisch wird die Kenntlichmachung durch einen Sonartransponder realisiert. Der Begriff Transponder ist zusammengesetzt aus den Begriffen Transmitter (Sender) und Responder (Antwortender) und trägt dem Zusammenhang Rechnung, dass das System nur im Notfall durch ein vom U-Boot gesendetes Sonarsignal aktiviert wird und mit einem definierten Sonarsignal antwortet. Offshore-Windparks benötigen aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung mehrere Sonartransponder an ihren äußeren Begrenzungen. An die Gesamtkonfiguration der Sonartransponder besteht die Anforderung, auch unter ungünstigen hydroakustischen Bedingungen und in sicherer Entfernung von einem Offshore-Windpark ein ausreichend hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen. Gleichzeitig müssen die negativen Einflüsse des erzeugten Unterwasserschalls auf marine Säugetiere minimal gehalten werden. Marine Säugetiere wie Schweinswale und Seehunde nutzen Schallwellen zur Orientierung und zur Lokalisation von Beute. Bereits kurzzeitige anthropogene Schallereignissen können bei diesen Tieren zu einer vorübergehenden oder anhaltenden Hörschwellenverschiebung führen und deren natürliches Bewegungsmuster nachteilig beeinflussen.

Der vorliegende Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Erforschung von Sonartranspondern für Offshore-Windparks und technische Integration in ein Gesamtkonzept" beschäftigt sich zum einen mit der im Vorhabensteil B durchgeführten Entwicklung eines praxistauglichen Transpondersystems für Offshore-Windenergieanlagen. Zum anderen werden simulationsbasierte und messtechnische Untersuchungen der erzielbaren Signalreichweiten aus Vorhabensteil A unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und die Bewertung des Systems unter ökologischen Gesichtspunkten behandelt. Das Forschungsvorhaben wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

Der Hauptteil dieses Berichtes gliedert sich im Wesentlichen in die vier Kapitel 2 bis 5. In Kapitel 2 wird die im Vorhabensteil B vollzogene Entwicklung der beiden Transpondersysteme beschrieben. Neben der Entwicklung von Steuergerät und Schallwandler werden die Installationsprozeduren an Land und auf See erläutert, um Empfehlungen für eine effiziente Installation abzuleiten. Kapitel 3 beschäftigt sich mit den physikalischen Grundlagen zur Beschreibung der Ausbreitung des

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> seit 01.02.2009: Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik der Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen der Bundeswehr, Maritime Technologie und Forschung (WTD71)

Transpondersignals und beschreibt die Entwicklung eines zweistufigen Berechnungsansatzes zur Simulation der Richtungsabhängigkeit und Reichweite des Transpondersignals. Ferner liefert Kapitel 3 die Grundlage für die Wahl der Messpunkte zur Durchführung der Messkampagnen. Kapitel 4 beschreibt die durchgeführten Messkampagnen im Testfeld *alpha ventus*. Neben der methodischen Vorgehensweise während der Messungen werden darin die Ergebnisse zu den Ausbreitungsverlusten, zur Aktivierbarkeit, zur Störfestigkeit sowie zu Auslöschungseffekten während des Betriebes eines oder mehrerer Transponder erläutert. In Kapitel 5 wird der Einsatz von Sonartranspondern hinsichtlich seiner biologischen Relevanz untersucht. Als Grundlage dienen die in diesem Vorhaben gewonnenen Messdaten sowie aktuelle biologische Forschungsergebnisse.

#### 1.2 Zusammenarbeit im Vorhaben

#### von Moritz Fricke (ISD)

Das Vorhaben "Erforschung von Sonartranspondern für Offshore-Windparks und technische Integration in ein Gesamtkonzept" wurde als Verbundvorhaben zwischen dem Institut für Statik und Dynamik (ISD) der Leibniz Universität Hannover als projektleitendes Institut und der Firma THALES Instruments GmbH als Industriepartner unter den Förderkennzeichen 0325104A und 0325104B durchgeführt. In das Projekt wurden das Institut für technische und angewandte Physik GmbH (ITAP), das Deutsches Windenergie-Institut GmbH (DEWI) sowie die Fa. BioConsult SH über FuE-Auftragsvergaben eingebunden.

Das Institut für Statik und Dynamik (ISD) der Universität Hannover wurde 2005 als Zusammenschluss des Instituts für Statik und des Curt-Risch Instituts für Dynamik, Schall- und Messtechnik gegründet. Auf dem Gebiet der Schwingungen liegen bedeutende Forschungsschwerpunkte in den Themenbereichen "Schadensfrüherkennung bei Offshore-Windenergieanlagen" und "Schallimmisionen bei der Errichtung von OWEA".

Die Firma THALES Instruments ist im Bereich der Installation, Wartung und Inbetriebnahme komplexer Onshore- und Offshore-Messstationen tätig. Dies umfasst die gesamte elektrotechnische Ausstattung zur Aufzeichnung ozeanographischer Parameter, Klimamessungen, Stromversorgung und Beleuchtungstechnik sowie die notwendige Sensorik zur Zustandsüberwachung der Anlagen.

Das Institut für technische und angewandte Physik GmbH (ITAP), gegründet 1992, besitzt nunmehr den Status eines "Instituts an der Universität Oldenburg". Die Aufgaben der ITAP GmbH bestehen überwiegend aus anwendungsbezogener Forschung und Dienstleistung, wobei die Tätigkeitsschwerpunkte in den Bereichen Schallemissionen und -immissionen, Hydro-, Maschinen- und Strömungsakustik liegen.

Das Deutsche Windenergie-Institut (DEWI), gegründet 1990, bietet als neutrale Institution seine Dienstleistungen mittlerweile in mehr als 30 Ländern an. Das Spektrum des DEWI umfasst u.a. die Vermessung von Windenergieanlagen (Leistung, Netzrückwirkung, Geräusch, Beanspruchung), Windpotenzialermittlung und Windmessungen, Prognose von Energieertrag, Geräusch und Eiswurf sowie Schattenwurfberechnung, Anemometerkalibration und Projektprüfung.

Das Tätigkeitsfeld von BioConsult SH wird derzeit von angewandter Umweltforschung und der Erstellung von Umweltverträglichkeitsstudien und FFH-Verträglichkeitsprüfungen und den dafür zugrunde liegenden Fachgutachten geprägt. BioConsult SH hat umfangreiche Erfahrung in allen Bereichen ökologischer Umweltforschung im marinen Bereich und hat zahlreiche Projekte zur Erhebung biologischer Grundlagendaten bis hin zur Entwicklung von Schutzkonzepten durchgeführt. Das ISD zeichnete im Vorhabensteil A verantwortlich für die Erstellung eines Simulationsmodells für die Ausbreitung des Transpondersignals, die Planung und Koordination der Messkampagnen sowie die Auswertung der Übertragungsverluste zur Validierung des Simulationsmodells. Das ITAP führte vergleichende Simulationen auf Basis eines weiteren Berechnungsansatzes durch und untersuchte im Rahmen der Messkampagnen die Aktivierbarkeit und Störfestigkeit hinsichtlich versehentlicher Fehlaktivierungen der Transpondersysteme. Ferner wurden vom ITAP auf dem Meeresboden abgesetzte autarke Messgeräte eingesetzt, um die zeitliche Varianz des akustischen Ausbreitungspfades während der Messkampagnen zu bewerten und so die Messungen zur Bestimmung der Übertragungsverluste methodisch zu validieren. Das DEWI führte in Zusammenarbeit mit dem ISD die Messungen zur Bestimmung der Übertragungsverluste und die Bewertung von Überlagerungseffekten bei zeitgleicher Aktivität zweier Transponder durch. Die Firma BioConsult SH untersuchte auf Basis der gewonnenen Messdaten und anhand aktueller Forschungsergebnisse die möglichen Auswirkungen der Transpondersignale auf marine Säugetiere. Ferner erarbeitete BioConsultSH Empfehlungen für die Modifikation des Transponder-Signals unter ökologischen Gesichtspunkten, die bei der Auslegung des Transpondersystems berücksichtigt wurden. Im Vorhabensteil B führte THALES Instruments die Entwicklung der Transpondersysteme sowie deren Installation im Offshore-Windpark alpha ventus durch. Des Weiteren vollzog THALES Instruments die Aktivierung der Transponder während der Messkampagnen in enger Zusammenarbeit mit den forschenden Instituten.

#### 1.3 Zusammenfassung

#### von Moritz Fricke (ISD)

Das entwickelte Sonartranspondersystem erfüllt die in (Nissen 2004) formulierten Anforderungen an die akustische Kenntlichmachung von Offshore-Windparks. Mit dem überarbeiteten Schallwandler des Systems THALES WISO ST01 konnte ein Quellpegel von 198 dB re 1µPa in 1m erreicht werden. Aufgrund der Geometrie des Schallwandlers erreichte das System die für den Windpark *alpha ventus* reduzierte horizontale Winkelabdeckung von 180° mit nur einem angeschlossenen Schallwandler nicht. Aus diesem Grund wurde das Steuergerät dahingehend erweitert, dass der Anschluss von bis zu vier Schallwandlern möglich ist, die an der Gründungkonstruktion in unterschiedlichen Richtungen angebracht werden können. Eine derartige Anordnung ist gerade an stark konvexen Ecken eines Windparks erforderlich.

Die an Land und im Testfeld *alpha ventus* durchgeführten Installationsarbeiten von zwei Transpondersystemen an den Anlagen AV10 und AV12 zeigen, dass sowohl eine vorherige als auch eine nachträgliche Ausstattung der Gründungskonstruktionen mit einem Sonartransponder möglich ist. Ausgehend von den während der Installationsarbeiten auf See gewonnenen Erfahrungen ist es jedoch sinnvoll, einen Großteil der Arbeiten bereits an Land, d.h. vor der Installation der Gründungkonstruktion, durchzuführen. Dies betrifft die Montage der Halterungen für die Schallwandler sowie die Verlegung des Verbindungskabels zwischen Steuergerät und Schallwandler. Die Installation des Schallwandlers sollte nach derzeitigem Kenntnisstand erst auf See durchgeführt werden, um mögliche Beschädigungen während der Rammarbeiten zu vermeiden.

Die Simulationsergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus (Nissen 2004). Die simulierten Ausbreitungsverluste zeigen eine große Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe. Unter den in (Nissen 2004) getroffenen Annahmen für den Störgeräuschpegel im betrachteten Frequenzbereich bestätigen die in diesem Vorhaben erzielten Simulationsergebnisse, dass für eine sichere Detektion des Transpondersignals in einer Entfernung von 2 NM (nautische Meilen) unter ungünstigen Wetterbedingungen ein Quellpegel von 200 dB re 1 $\mu$ Pa in 1m erforderlich ist. Darüber hinaus wird die ausgeprägte Richtungsabhängigkeit des Schallfeldes deutlich, die durch die Richtcharakteristik des Schallwandlers hervorgerufen wird.

Zur Bestimmung der Ausbreitungsverluste unter unterschiedlichen Wetterbedingungen wurden im Rahmen des Vorhabensteils A zwei Messkampagnen (bei gutem Wetter im Oktober 2010 und bei schlechtem Wetter im Februar 2011) im Testfeld *alpha ventus* durchgeführt (vgl. Kap. 4). In Entfernungen von mehr als 2 km zeigt sich eine erheblich stärkere Dämpfung und somit eine Einschränkung der Reichweite des Transpondersignals mit zunehmender Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe. Eine Messung unter den in (Nissen 2004) angegebenen kritischen Bedingungen (v<sub>wind</sub> = 15 m/s und H<sub>s</sub> = 1,5 m) konnte leider nicht realisiert werden. Die Extrapolation der Ergebnisse der zweiten Messkampagne auf diese Wetterbedingungen anhand des erstellten Simulationsmodells zeigt jedoch, dass der Ausbreitungsverluste in 2 NM mit ca. 100 dB anzunehmen ist. Auch dieses Ergebnis unterstreicht die Forderung nach einem Quellpegel von 200 dB re 1µPa in 1m.

Neben der Bestimmung der Ausbreitungsverluste wurde während der ersten Messkampagne ein Aktivierungstest mithilfe eines abgesenkten Unterwasser-Schallsenders durchgeführt. Dabei wurde der Sender mit unterschiedlich hohen Spannungspegeln und unterschiedlichen Signalsequenzen angesteuert. Den Versuchen zufolge wird die für eine Aktivierung notwendige empfangsseitige Empfindlichkeit des Transponders knapp erreicht. Neben der Überprüfung auf Aktivierbarkeit beinhaltete der Test eine Überprüfung auf Störfestigkeit bzw. Unempfindlichkeit gegen Fehlaktivierungen. Im Rahmen der durchgeführten Tests mit Rauschsequenzen verschiedener Bandbreiten und Längen konnte der Transponder nicht ausgelöst werden. Diese gilt gleichermaßen für zu kurze harmonische Signale innerhalb des Aktivierungsfrequenzbandes.

Während der zweiten Messkampagne wurde eine Messreihe während des zeitgleichen Sendens der beiden Transponder an AV10 und AV12 aufgenommen, um den Effekt der räumlichen und zeitlichen Überlagerung zweier Signal festzustellen. Aufgrund der kurzen Wellenlängen und der hohen zeitlichen Varianz des Ausbreitungspfades zeigen die Ergebnisse keine Bereiche ausgeprägter Auslöschung.

Die in Kapitel 5 beschriebenen ökologischen Untersuchungen zeigen, dass nicht mit einer Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen und Seehunden aufgrund des Transpondersignals zu rechnen ist. Die wesentlichen Effekte von Sonartranspondern auf Schweinswale und Seehunde sind Vergrämung, Verhaltensänderungen und Stress. Für Schweinswale wird unter guten Wetter- und Schallausbreitungsbedingungen eine Vergrämung bis zu 7,5 km und Verhaltensänderungen bis zu 16 km erwartet. Für Seehunde werden Vergrämung bis zu 1,6 km, deutliche Verhaltensänderungen bis in eine Entfernung von 3,7 km und leichte Verhaltensänderungen bis hin zu 5,5 km erwartet. Aufgrund der nur seltenen Aktivierung von Sonartranspondern ist mit keiner wesentlichen Beeinflussung von marinen Säugetieren zu rechnen. Eine andauernde oder regelmäßige Nutzung der Sonartransponder erfordert jedoch eine biologische Neubewertung der Situation.

#### 1.4 Ausblick

#### von Ole Ehrt (THALES Instruments) und Moritz Fricke (ISD)

Das entwickelte Transpondersystem THALES WISO ST01 liefert das gerätetechnische Konzept für eine aus biologischer Sicht tolerierbare Kenntlichmachung von Offshore-Windparks für getauchte Unterwasserfahrzeuge. Die Entwicklungen liefern die Grundlage für eine Überführung zur Marktreife. Durch die Anschlussmöglichkeit von bis zu vier Schallwandlern und die bereits implementierte Netzwerkanbindung ist es möglich, zum einen auch stark konvexe Ecken von Windparks abzudecken, zum anderen eine Fernsteuerung und -überwachung der Transponder zu verwirklichen. Das Gerätekonzept der Sonartransponder liefert darüber hinaus eine technische Infrastruktur (Halterungen der Schallwandler, Steuerungsgerät, Netzwerkanbindung), die die Erweiterung des Systems um eine hydroakustische Monitoringfunktion ermöglicht. Denkbar wäre z.B., an der ohnehin anzubringenden Halterung des Schallwandlers ein Hydrofon zu installieren oder den vorhandenen Schallwandler so zu modifizieren, dass eine breitbandige Aufnahme von Umgebungsgeräuschen auch ohne zusätzliches Hydrofon möglich wird.

Durch die Erkenntnisse des Projektes sowie die Gespräche mit den an der Installation beteiligten Fachleuten wurde die technische Spezifikation des Sonartransponders stetig optimiert. Es wird erwartet, dass durch die Fortführung dieser Gespräche neben dem Produkt selbst die Prozesse zur Installation und Wartung auf See verschlankt und vereinfacht werden können und somit Kostenersparnisse für die Betreiber der Windparks als spätere Nutzer entstehen. In zukünftige Gespräche sollen auch weitere Anspruchsgruppen wie z.B. Taucher und Naturschutzverbände integriert werden, um eine höhere Akzeptanz der Systeme zu erreichen.

Es ist aus technischer Sicht denkbar, die Forschung und Entwicklung auf die Anwendbarkeit des Systems für weitere Anwendungen neben der Windindustrie auszudehnen. Dabei ist ausdrücklich zu berücksichtigen, dass die in diesem Vorhaben getroffenen Aussagen bezüglich möglicher ökologischer Effekte nur für eine seltene Aktivierung der Transponder in marinen Notfällen gültig sind. Eine anderweitige, d.h. nach aktuellem Stand nicht bestimmungsgemäße Nutzung der Sonartransponder würde eine Neubewertung der biologischen Effekte erfordern.

Das entwickelte Simulationsmodell für die Schallabstrahlung und -ausbreitung ist aufgrund der Trennung zwischen der Quelle und dem Ausbreitungspfad prinzipiell dazu geeignet, auch andere Formen von Schallwandlern (z.B. in Form eines Zylinders oder einer kreisförmigen Kolbenmembran) zu berücksichtigen. Ferner ist es möglich, in die Ray-Tracing-Simulation probabilistische Ansätze für das Schallgeschwindigkeitsprofil zu integrieren, um der großen zeitlichen Variabilität des Schallgeschwindigkeitsprofils Rechnung zu tragen.

# 2 Entwicklung des Transpondersystems (FKZ 0325104B)

#### von Wassim Hayek (THALES Instruments)

Der Sonartransponder THALES WISO ST01 dient der akustischen Kenntlichmachung von künstlichen Unterwassergefahrenquellen wie z.B. Windenergieanlagen zur Verminderung des Kollisionsrisikos mit Unterwasserfahrzeugen. Die akustische Warnung dient als Kenntlichmachung der Offshore-Windparks in Notfallsituationen für U-Boote - im getauchten und aufgetauchten Zustand – wie im Falle von mittelschwerer See mit Radarverlust.

Der THALES WISO ST01 besteht aus bis zu vier Schallwandlern und einer Steuerungselektronik. Die Schallwandler werden auf halber Wassertiefe, z.B. am Fundament einer Windenergieanlage, installiert, während sich die Steuerungselektronik im Turm der Windenergieanlage bzw. in einem separaten Gehäuse auf der Plattform befindet.

Der THALES WISO ST01 wird durch das Aussenden eines genau definierten akustischen Notsignals durch ein U-Boot aktiviert. Als Reaktion auf die Aktivierung sendet der THALES WISO ST01 unverzüglich ein definiertes akustisches Warnsignal, das im Ernstfall dazu beiträgt, eine Kollision zu verhindern.

#### 2.1 Stand der Technik bei Vorhabensbeginn

#### von Wassim Hayek (THALES Instruments)

Eine ausführliche Marktrecherche hat ergeben, dass zum Zeitpunkt des Projektbeginns keine Sonartransponder mit den geforderten Spezifikationen am Markt existierten, weder in Deutschland noch im Ausland. Angefragt wurden nationale und internationale Firmen im Bereich der Unterwasserschalltechnik sowie Hersteller und Zulieferer von Einzelkomponenten wie Schallwandlern oder Ansteuerungen für Schallwandler. Selbst Zulieferer aus England und Norwegen, die seit Jahrzehnten die Ölund Gasindustrie unter anderem mit Unterwasserschallkomponenten wie Unterwassertelefonen, Hydrofonen oder akustischen Auslösern beliefern, waren nicht in der Lage ein entsprechendes Produkt anzubieten.

Die in der Literaturliste angegebenen Quellen ((Lurton 2002), (Waite 2001) und (Sherman u. a. 2008)) geben Hinweise auf das prinzipielle Funktionsprinzip von Sonartranspondern und liefern allgemeine Grundlagen der Unterwasserakustik und deren vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Bei der hier beschriebenen Anwendung handelt es sich um eine neue Entwicklung, die bisher nicht existiert.

#### 2.2 Technische Anforderungen

#### von Wassim Hayek (THALES Instruments)

Die Ausstattung von künstlichen Unterwassergefahrenquellen (z.B. Offshore-Windparks) mit Sonartranspondern wird seitens der Bundeswehr zur Vermeidung von Kollisionen von U-Booten mit künstlichen Unterwasserhindernissen sowohl zum Schutz der U-Boote als auch der baulichen Anlagen gefordert. Der Bericht der Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik (FWG)<sup>3</sup> über die "Akustische Kenntlichmachung von künstlichen Unterwassergefahrenquellen, Empfehlung für akustische Sendepegel" (Nissen 2004) wurde von der Marine grundsätzlich als Funktionsvorgabe für Sonartransponder für künstliche Unterwassergefahrenquellen (z.B. Offshore-Windparks) übernommen.

Es sind folgende seitens der Marine, genauer gesagt der Wehrbereichsverwaltung Nord, vorgenommenen Modifizierungen bzw. Konkretisierungen der Leistungsparameter zu beachten:

#### a) Abdeckung durch Sonartransponder

Die Vorgabe, dass an der konvexen Hülle des Windparkgebietes alle vier Seemeilen ein Sonartransponder anzubringen ist, wird durch eine Einzelfallprüfung und -festlegung durch das Flottenkommando konkretisiert. Die geforderte Gesamtabdeckung durch die Sonartransponder richtet sich grundsätzlich nach der Lage des Offshore-Windparks, der Anzahl der Eckpunkte der konvexen Hülle des Offshore-Windparks sowie nach den durch die Sonartransponder abzudeckenden Bereichen und der Lage und Ausstattung mit Sonartranspondern anderer, in der Nähe befindlicher Offshore-Windparks bzw. künstlicher Unterwassergefahrenquellen.

#### b) Keine Aktivierung der Sonartransponder über Funk

Die Anforderungen in (Nissen 2004) enthielten ursprünglich eine Aktivierung über Funk, die bei Fahrt in Seerohrtiefe möglich ist. Im Laufe des Forschungsvorhabens wurde seitens der Wehrbereichsverwaltung Nord auf diese Aktivierungsmöglichkeit verzichtet. Es ist daher keine Aktivierung der Sonartransponder über Funk vorgesehen.

#### c) Toleranzen bei Anbringungshöhe und Schallpegel

Die Höhe der Anbringung der Sonartransponder richtet sich nach der jeweiligen Wassertiefe des Anlagenstandortes. Die Sonartransponder sind grundsätzlich in halber Wassertiefe anzubringen (Nissen 2004). Diese Spezifikation wurde im Laufe des Forschungsvorhabens um eine Toleranz von +/- 10 % bezogen auf die halbe Wassertiefe des jeweiligen Standortes (oder +/-5% bezogen auf die jeweilige Wassertiefe) ergänzt.

Es ist ein Quellpegel von 200 dB re 1µPa in 1m für ein kontinuierliches Sinussignal (CW) für die genannten Frequenzen 7.0, 7.3, 7.5 und 7.8 kHz vorgesehen (Nissen 2004). Diese Spezifikation wurde im Laufe des Forschungsvorhabens um eine Toleranz von +/- 3 dB ergänzt. Die Angabe einer Pegeltoleranz ist üblich bei der Spezifikation elektroakustischer Wandler und trägt u.a. Fertigungstoleranzen Rechnung.

#### d) Anzeige Funktionsdefekt

Bei einem Transponder-/ Systemausfall ist sicherzustellen, dass der Funktionsdefekt des Gerätes sofort anzeigt wird. Wie diese Information sichergestellt werden kann, wird dem Windparkbetreiber bzw. dem Hersteller der Sonartransponder freigestellt. Die Störung ist unverzüglich zu beheben.

#### e) Ausfall Stromversorgung

Ein Ausfall der Stromversorgung im Offshore-Windpark ist ggf. über ein Notstromaggregat oder anderweitig zeitlich befristet zu überbrücken. Die Störung ist unverzüglich zu beheben.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> seit 01.02.2009: Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik der Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen der Bundeswehr, Maritime Technologie und Forschung (WTD71)

Da die eingesetzten Fahrzeuge durchgängig über Unterwassertelefone (UT) verfügen, bietet sich als Aktivierungsimpuls ein 8kHz-CW-Signal der Länge von mindestens einer Sekunde an, das man durch die Telegraphiekomponente der Telefone erzielen kann. Der Transponder antwortet daraufhin fünf Minuten lang mit wechselnden Sinus-Pulsen (Nissen 2004).

Die eingesetzten Geräte UT12 und UT2000 liefern einen Pegel von 200 dB re 1µPa in 1m. Die akustische Aktivierungskomponente ist damit festgelegt. Ein Doppler für eine Fahrgeschwindigkeit von maximal 10kn ist zu berücksichtigen. Dieses entspricht einer Unsicherheit von  $2*v*f/c \sim 60$  Hz (Nissen 2004).

#### 2.3 Systemarchitektur des Transpondersystems

von Wassim Hayek (THALES Instruments)

Der Sonartransponder THALES WISO ST01 besteht aus

- einem Steuergerät,
- bis zu vier Leistungsverstärkern
- bis zu vier Schallwandlern und
- je einem Kabel zur Verbindung von Leistungsverstärker und Schallwandler.

Zur Fernsteuerung und Übermittlung von Statusinformationen sind potentialfreie Kontakte und ein Netzwerkanschluss vorhanden. Die Stromversorgung erfolgt über einen 230V-Netzanschluss.

Neben Netzwerkanschluss und potentialfreien Kontakten (2x Eingänge und 6x Ausgänge) verfügt das System über folgende Schnittstellen:

- USB (2x)
- I/O
- Maus
- Keyboard
- VGA (Monitor)
- Schallwandler-Anschluss

An der Gerätefront sind 2 potentialfreie Eingänge und 6 potentialfreie Ausgänge (Signalisierung von Fehlern) über eine 16-polige Federzug-Klemmleiste zugänglich:

#### Tab. 1: Beschreibung potentialfreie Ein- und Ausgänge

| Eingang                                | 1 Eing | ang 2 | Feh     | ler 1 | Feh | ler 2 | Feh | ler 3 | Feh | ler 4 | Feh | ler 5 | Feh | ler 6 |
|--|--------|-------|---------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 |        |       |         |       |     | 16    |     |       |     |       |     |       |     |       |
| Eingang 1 Auslösun                     |        |       | igger 1 |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |

| Eingang 2 | Auslösung Trigger 2  |
|-----------|--|
| Fehler 1  | Fehler allgemein:  |
|           | Dieses Signal stellt eine logische UND-Verknüpfung der 5 unten aufgeführten Fehlermöglichkeiten dar. |
| Fehler 2  | Fehler in der Stromversorgung:   |
|           | Betriebsspannung ist unter 11V gesunken (z.B. bei Batteriebetrieb).                                  |
| Fehler 3  | Fehler am PC:  |
|           | Der PC wird vom Watchdog neu gebootet.   |
| Fehler 4  | Fehler am Schallwandler:   |
|           | Der Selbsttest hat einen Fehler am Schallwandler festgestellt.                                       |
| Fehler 5  | Fehler am Sender:  |
|           | Der Selbsttest hat einen Fehler am Sender festgestellt.  |
| Fehler 6  | Fehler am Empfänger:   |
|           | Der Selbsttest hat einen Fehler am Empfänger festgestellt.   |

Die Eingänge werden durch Anlegen einer Gleichspannung von 5V (10mA) aktiviert. Der zulässige Eingangsspannungsbereich ist 0...15V (Polarität der Klemmen ist minus (links) und plus (rechts); bei Falschpolung keine Funktion). Die Auslösesignale sollten für eine Dauer von mindestens 0,5 Sekunden anliegen. Die Funktion der Eingänge wird softwareseitig festgelegt.

Die Ausgänge sind im Grundzustand (Gerät ausgeschaltet) offene Relaiskontakte. Der "OK"-Zustand wird durch geschlossene Kontakte signalisiert. Ein offener Kontakt zeigt einen Fehler an. Die Zuordnung der Ausgänge ist hardwareseitig festgelegt.



Abb. 1: Systemübersicht des ersten Prototyps

Der erste Sonartransponder-Prototyp wurde für nur einen Schallwandler mit einer Winkelabdeckung von 90° konstruiert (vgl. Abb. 1). Um die für den Windpark *alpha ventus* bestehende Anforderung von 180° Winkelabdeckung mit 200dB erfüllen zu können, wurden beim zweiten Sonartransponder-Prototyp zwei Schritte unternommen:

Zuerst wurde die Geometrie des Wandlergehäuses geändert. Dies hat dazu geführt hat, dass eine maximale Winkelabdeckung von 120° mit 200dB erreicht wurde. Um jedoch an die für *alpha ventus* angeforderte Winkelabdeckung von 180° gelangen zu können, wurde daraufhin das Steuergerät weiterentwickelt, damit es gleichzeitig bis zu vier Schallwandler steuern kann, welche nebeneinander eingesetzt werden (vgl. Abb. 2).

Andererseits verfügte der erste Prototyp über eine interne 12V Batterie, die im Falle einer Notfallsituation, zwar das System mit Strom versorgt jedoch für nur eine einmalige Aktivierung des Schallwandlers ausreicht.

Bei dem zweiten Prototyp wurde der Batteriebetrieb abgeschafft, da die Windparks mit Notstromversorgungen ausgestattet sind.



Abb. 2: Systemübersicht des zweiten Prototyps

#### 2.4 Entwicklung von Steuergerät und Schallwandler

# 2.4.1 Entwicklung der Hardware und Implementierung der Signalverarbeitungsroutinen für das Steuergerät

#### von Wassim Hayek (THALES Instruments)

Das Steuergerät THALES WISO ST-01 (vgl. Abb. 3) kann bis zu 4 Schallwandler steuern. Es besteht aus einem Einschub für ein 19-Zoll-Schranksystem. Dieser Einschub ist in einen den Umgebungsbedingungen am Einsatzort angepassten Schaltschrank einzubauen - z.B. Plattform im Turm der Windenergieanlage oder im Transition-Piece.

Das Steuergerät besteht aus 3 Hauptkomponenten:

- PC (Industrie-PC)
- 2 Leiterplatten
- Leistungsverstärker



Abb. 3: Das Steuergerät THALES WISO ST-01

Der PC ist ein Industrie-PC, mit einer speziell für diese Anwendung entwickelten Software. Ein Industrie-PC muss gegenüber Geräten für den Bürobereich besonderen Anforderungen genügen und wird in der Regel besonders robust z. B. gegenüber Umwelteinflüssen oder elektromagnetischen Störungen und insgesamt weitgehend ausfallsicher ausgelegt.

Die erste Leiterplatte besteht aus vier Komponenten: Spannungsversorgung, Empfänger, Digital I/O und Watchdog. Die Spannungsversorgung des Systems 230 V wird in zwei verschiedene Spannungen für die Steuerelektronik umgewandelt: ±10V für den Schallwandler und Empfänger sowie +5V für den Watchdog und Digital I/O.

Abb. 4 zeigt das Flussdiagramm des Systems: Wird ein akustisches Signal vom Schallwandler in ein elektrisches Signal umgewandelt, so wird dies an den Empfänger weitergeleitet. Der Empfänger filtert und verstärkt seinerseits dieses Signal und leitet es an den PC weiter. Die Software führt daraufhin einen Vergleich zwischen dem erhaltenen Signal und einem einstellbaren Schwellwert durch. Der Schwellwert wird bei der Aktivierungsfrequenz 8,08kHz (Deutschland) bzw. 8,88kHz (international) ausgewertet. Ist das empfangene Signal größer als der Schwellwert, so schaltet das Programm den Leistungsverstärker/Schallwandler zum Senden ein; ist das Signal jedoch kleiner als der Schwellwert, so wird das System in den Standby-Modus zurückgesetzt.

Der Digital I/O und der Watchdog sind für Statusanzeige und Potentialfreie Kontakte zuständig.

Die zweite Leiterplatte besteht ihrerseits aus zwei Komponenten: Statusanzeige und potentialfreie Kontakte. Die Statusanzeige zeigt über Leuchtdioden an, ob das System einen Fehler aufweist bzw. ob es einwandfrei funktioniert. Über die potentialfreien Kontakte werden die Fehler signalisiert.



Abb. 4: Flussdiagramm THALES WISO ST-01

Bei der Entwicklung des ersten Prototyps (vgl. Abb. 5) wurde viel Wert auf einen geringen Stromverbrauch gelegt, deshalb wurde das Netzteil unter der Maßgabe einer geringen Leistungsaufnahme ausgewählt. Um jedoch die benötigte Leistung beim Senden erreichen zu können, wurde eine interne Batterie (Pufferbatterie) eingebaut, welche ihrerseits im Standby-Modus über das Netzteil geladen wird. Zusätzlich dazu dient diese Batterie im Falle eines Stromausfalls im Windpark als Notstromversorgung für das System.



Abb. 5: Blockdiagramm Prototyp 1

Bei dem zweiten Prototyp (vgl. Abb. 6) wurde die Batterie abgeschafft. Demzufolge wurde das Netzteil gegen ein leistungsstärkeres getauscht, das für den Sendemodus genügend Leistung zur Verfügung stellt.

Der Leistungsverstärker wurde hier vom Steuergerät getrennt und in einen Einschub für ein 19-Zoll-Schranksystem eingebaut. Da das Steuergerät bis zu vier Schallwandler steuern kann, ist es kostengünstiger und mit einem geringeren Aufwand verbunden, die Steuergeräte nach Kundenbestellung anzufertigen anstatt sie alle serienmäßig mit vier Leistungsverstärkern zu bestücken.

Bei der Entwicklung dieses zweiten Prototyps wurde zudem besonders darauf geachtet, dass in diesem Ausnahmefalle der Aktivierung in einer Notfallsituation etwaige Auswirkungen auf marine Säugetiere, möglichst gering ausfallen. Deshalb wurde das System mit einem Soft-Start erweitert. Bei einem Soft-Start steigt der Sendepegel bis zur vierten Wiederholung des Sendezyklus linear an, bis er den max. Sendepegel von 200dB erreicht hat.



Abb. 6: Blockdiagramm Prototyp 2

Eine weitere, in Zukunft zu realisierende Weiterentwicklung der THALES WISO ST-01 wäre die Ortung der Schallquelle (U-Boot), um gezielt den in Richtung des U-Boots gerichteten Schallwandler zu aktivieren.

Der Sonartransponder (Steuergerät) und der Leistungsverstärker haben folgende Spezifikationen:

| Standort             | Plattform im Turm der Windenergieanlage oder im Transition-Piece (Zu-<br>sammen mit dem Steuergerät) |
|----------------------|--|
| Gehäuse              | 19"-Einschub / 3HE   |
| Schutzgrad           | IP30   |
| Maße (BHT)           | Ca. 48cm x 14cm x 38cm   |
| Masse                | Ca. 10Kg   |
| Stromversorgung      | 190260V AC   |
|                      | 4763Hz   |
| Leistungsaufnahme    | Ca. 25W  |
| Umgebungsbedingungen | Temperatur 0+50°C  |
| Im Betrieb           | Luftfeuche 1090%rH nicht kondensierend   |

Tab. 2: Technische Spezifikationen Steuergerät

| Umgebungsbedingungen | Temperatur -10+65°C                           |
|----------------------|---|
| Bei Lagerung         | Luftfeuche 1095%rH nicht kondensierend        |
| Schnittstellen       | Ethernet                                      |
|                      | Fehlerabsetzung über Potential freie Kontakte |

#### Tab. 3: Technische Spezifikationen Leistungsverstärker

| Standort             | Plattform im Turm der Windenergieanlage oder im Transition-Piece (Zu-<br>sammen mit dem Steuergerät) |  |  |  |  |
|----------------------|--|--|--|--|--|
| Gehäuse              | 19"-Einschub / 4HE   |  |  |  |  |
| Schutzgrad           | IP30   |  |  |  |  |
| Maße (BHT)           | Ca. 48cm x 18cm x 38cm   |  |  |  |  |
| Masse                | Ca. 22Kg   |  |  |  |  |
| Stromversorgung      | 190260V AC   |  |  |  |  |
|                      | 4763Hz   |  |  |  |  |
| Leistungsaufnahme    | Überwachungsbetrieb: ca. 20W   |  |  |  |  |
|                      | Sendebetrieb: max. 1000W   |  |  |  |  |
| Umgebungsbedingungen | Temperatur 0+50°C  |  |  |  |  |
| Im Betrieb           | Luftfeuche 1090%rH nicht kondensierend   |  |  |  |  |
| Umgebungsbedingungen | Temperatur -10+65°C  |  |  |  |  |
| Bei Lagerung         | Luftfeuche 1095%rH nicht kondensierend   |  |  |  |  |

#### 2.4.2 Realisierung der Selbsttest- und Protokollfunktionen

von Wassim Hayek (THALES Iinstruments)

Der Sonartransponder überwacht selbsttätig seine Funktion. Dabei werden die Fehler über die potentialfreien Kontakte signalisiert.

Ständig überwacht werden:

- die Betriebsspannung (Fehler wenn die Betriebsspannung, z.B. bei Batteriebetrieb, unter 11V sinkt)
- die Steckverbindung zu den Schallwandlern (Fehler wenn einer der Schallwandler nicht gesteckt ist; dann kann auch das Sendesignal nicht manuell ausgelöst werden)
- Software ist aktiv (Fehler wenn der Hardware-Watchdog nicht mindestens einmal pro Minute von der Software getriggert wird. Dann wird der PC f
  ür ca. eine Minute von der Betriebsspannung getrennt und anschließend neu gestartet).

• der Empfangspegel (wird z.Z. nicht zur Fehlersignalisierung genutzt)

Die ersten 3 Tests sind vollständig hardwarebasiert und funktionieren daher unabhängig vom Steuerrechner und der Systemsoftware.

Ca. 8 Sekunden nach dem Programmstart wird ein umfangreicher, softwaregestützter Selbsttest zur Prüfung des Gesamtsystems durchgeführt:

- Sendesignal aussenden (<40 dB),
- Signal empfangen und
- Signal detektieren.

Dazu wird ein Sendesignal mit der Frequenz 7800Hz bei geringem Schallpegel (z.Z. 1% des Maximalpegels) abgestrahlt. Dieser nicht hörbare Schallpegel wurde bewusst so niedrig wie möglich gesetzt, um die marine Umwelt nicht zu belasten und dennoch die Bereitschaft des Gerätes zu gewährleisten. Wenn dieses Signal als Auslösesignal erkannt wurde, wird der Sendevorgang abgebrochen. Wird das Signal nicht erkannt, wird der Sendevorgang nach spätestens 8 Sekunden beendet und ein Fehler (Sender und Empfänger) signalisiert.

Empfehlungswert sind hier weitere Tests zur Unterscheidung von Fehlern, bei der Sender und Empfänger eine zyklische Wiederholung des Selbsttests (z.B. alle 24 Stunden) sowie eine Fernauslösung über einen der potentialfreien Eingänge erfahren.

Alle Statusinformationen (inkl. Datum und Uhrzeit) werden automatisch in eine Log-Datei "system.log" im Programmverzeichnis geschrieben:

- Programmstart und -ende,
- Erkennen eines Auslösesignals,
- Senden des Antwortsignals,
- Selbsttest und eventuell festgestellte Fehler.

Zusätzlich werden alle 10 Minuten die mittleren Empfangspegel und die aktuelle Verstärkereinstellung in eine Datei "sysnoise.log" geschrieben.

Die maximale Größe der Datei beträgt 10MB. Wird diese Größe erreicht, so wird die Datei gelöscht und neu angelegt. Unter normalen Betriebsverhältnissen wird dieser Fall erst nach über einem Jahr eintreten.

| "system.log":                              |
|--|
| 31.05.2010 08:08:59 Application startup Ok |
| 31.05.2010 08:09:08 System Test done: 0/0  |
| 31.05.2010 08:13:35 External Activation    |
| 31.05.2010 08:13:37 Transmitter active     |
| 31.05.2010 08:13:37 Receiver Gain[dB]: 40  |
| 31.05.2010 08:13:37 OutLevel[%]: 100       |
| 31.05.2010 08:14:00 External Activation    |
| 31.05.2010 08:14:02 Transmitter active     |
| 31.05.2010 08:14:02 Receiver Gain[dB]: 20  |
| 31.05.2010 08:14:02 OutLevel[%]: 100       |
| 31.05.2010 08:14:38 External Activation    |
| 31.05.2010 08:14:40 Transmitter active     |
| 31.05.2010 08:14:40 Receiver Gain[dB]: 20  |
| 31.05.2010 08:14:40 OutLevel[%]: 100       |
| "sysnoise.log":                            |

#### Tab. 4: Beispiele für die Dateien system.log und sysnoise.log

31.05.2010 08:18:00 Noise: -78,216926574707/ Peak Noise: -48,1420555114746/ Gain[dB]: 40

Es empfiehlt sich, anhand dieser ermittelten Werte den Bewuchszustand an der aktiven Oberfläche des Schallwandlers zu ermitteln, indem man eine Statistik über das Umgebungsgeräusch der letzten Monate mit den aktuellen Werten des zu untersuchenden Wandlers und mit denen der Nachbarwandler vergleicht. Werden die gemessenen Werte stetig leiser, so kann man davon ausgehen, dass sich der Bewuchs an der aktiven Oberfläche des Schallwandlers stark vermehrt hat. Da noch keine Erfahrungswerte existieren, ist es unvermeidbar, dass das Verfahren exemplarisch an zwei bis drei installierten Wandlern durch Sichtkontrollen (diese kann durch Taucher oder ROVs (Remotely Operated Vehicle) geschehen) validiert wird.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist diese Ermittlung der Bewuchszustandes eine erhebliche Erleichterung, da man den Einsatz vom Tauchern oder ROVs erheblich reduzieren kann.

#### 2.4.3 Entwicklung des Schallwandlers

#### von Wassim Hayek (THALES Instruments)

Die Entwicklung eines geeigneten Schallwandlers stellte eine der größten Herausforderungen im Forschungs- und Entwicklungsprojekt dar. Der Schallwandler an sich ist ein Gerät, das akustische Signale als Schallwechseldrücke in elektrische Signale, genauer gesagt elektrische Spannung umwandelt oder umgekehrt. Der THALES WISO ST01 Schallwandler besteht aus einem Stahlgehäuse und Piezokeramiken, die unter Einwirkung einer Verformung durch eine äußere Kraft eine Ladungstrennung zeigen. Das heißt, dass wenn das Material z. B. mit Druck beaufschlagt und so verformt wird, bilden sich elektrisch geladene Bereiche entweder an der Ober- bzw. Unterseite oder an gegenüberliegenden Mantelflächen. Dies wird als direkter piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Umgekehrt kann durch Anlegen einer elektrischen Spannung und einer daraus resultierenden Ladungsbildung eine Verformung hervorgerufen werden. Dies wird als inverser piezoelektrischer Effekt bezeichnet.



Abb. 7: Schallwandler des 200dB Systems

Zuerst wandte man sich aufgrund der teils herben Umweltbedingungen der Nord- und Ostsee dem äußeren Aufbau des Schallwandlers zu. Aufgrund des hohen Salzgehaltes kam nur ein Edelstahlgehäuse in Frage, in dem die Piezokeramiken integriert sind.

Für die Gesamtkonstruktion musste eine Vergussmasse gesucht werden, welche die Funktion nicht beeinträchtigt und seewasserbeständig ist und als dritte Anforderung keinerlei chemischen Wechselwirkungen mit dem Antifouling eingeht. Diese Beschichtung soll einen Bewuchs der aktiven Fläche verhindern, da ein Bewuchs die Leistungsfähigkeit des Systems erheblich vermindern kann. Im Extremfall kann ein stark bewachsener Schallwandler beim Senden irreparabel beschädigt werden. Wirksamkeit und Wirkungsdauer des Antifouling-Anstrichs hängen stark von den Umgebungsbedingungen wie Wassertemperatur, Salzgehalt und Strömungsgeschwindigkeit ab und können nicht vorhergesagt oder garantiert werden. Der Anstrich ist im Rahmen einer jährlichen Inspektion des Gesamtsystems zu überprüfen und eventueller Bewuchs an der Vorderseite des Schallwandlers sollte entfernt werden. Beim Reinigen des Schallwandlers darf kein Druck auf die aktive Fläche ausgeübt und die Fläche darf nicht beschädigt werden. Der Anstrich ist bei Bedarf, mindestens jedoch alle zwei Jahre, entsprechend den Verarbeitungsvorschriften des Herstellers zu erneuern.

Für die Installation des Schallwandlers auf See musste eine geeignete unter Wasser steckbare Verbindung gesucht werden. Vor diese Fragen gestellt veränderten die Ingenieure der THALES Instruments GmbH die Geometrie des Schallwandlers, um auf die gewünschten Spezifikationsmerkmale zu kommen.

Hatte der 188dB Prototyp noch eine horizontale Winkelabdeckung von  $\pm 45^{\circ}$ , so wurde durch die verbreiterte Form des 200dB Schallwandlers eine horizontale Winkelabdeckung von 120° erreicht. Die Form des Schallwandlers vereinfachte die akustische Entkopplung, welche über Gummipuffer zwischen Schallwandler und Montageplatte erzielt werden konnte.

In den weiteren Schritten wird eben diese Montageplatte noch weiter optimiert werden um eine möglichst taucherfreundliche Halterung zu gestalten, welche auch Impulsen von mehr als 4kN durch Wellenschlag standhalten kann.

Der Schallwandler hat nunmehr folgende Spezifikationen:

| Maße (BHT)                  | ca. 17cm x 100 | )cm x 22,5cm          |    |            |
|-----------------------------|----------------|-----------------------|----|------------|
| Masse                       | ca. 78kg       |                       |    |            |
| zul. Umgebungstemperatur    | im Betrieb:    | -5+30°C               |    |            |
|                             | bei Lagerung:  | -10+50°C              |    |            |
| Sendefrequenzbereich (-3dB) | 7,0 7,8kHz     |                       |    |            |
| max. Sendeschallpegel       | 200dB/µPa      | re                    | 1m | $\pm 3 dB$ |
|                             | (im gesamten S | Sendefrequenzbereich) |    |            |
| Abstrahlbereich             | Horizontal:    | $\pm 60^{\circ}$      |    |            |
|                             | Vertikal:      | $\pm 6^{\circ}$       |    |            |

Die Realisierung eines Schallwandlers mit einer Winkelabdeckung von 360° und Sendeschallpegel von 200 dB gestaltete sich sehr schwer. Deshalb ist es empfehlungswert, mehrere Schallwandler nebeneinander zu installieren, wenn eine Winkelabdeckung größer 120° erforderlich ist.

#### 2.4.4 Überführung des Prototypen zur Serienreife

#### von Wassim Hayek (THALES Instruments)

Der Unterwasserschallwandler des ersten Sonartransponders wurde gefertigt und an der Tripod-Konstruktion der WEA Multibrid M10 (AV10) installiert. Dies konnte vor der Errichtung des Offshore-Testfelds alpha ventus im Frühjahr 2009 an Land geschehen. Zu Beginn des Projekts wurden alle Anstrengungen auf die rasche Bereitstellung des Unterwasserschallwandlers konzentriert. Hierzu musste der vorhandene Labor-Prototyp neu konstruiert und offshore-tauglich gemacht werden. Dies beinhaltete unter anderem: Auswahl seewasserfester Materialien, Abschätzung der zu erwartenden Wellenlasten, Konstruktion der erforderlichen Stahlbauteile und Halterungen. Insbesondere war eine Reduzierung der Abmessungen erforderlich, um die Wellenlasten zu minimieren. Dieser erste Schallwandler hat einen Schallpegel von 188dB und einen Abstrahlwinkel von 90°.

Die Außenbefestigung des Schallwandlers sowie die Kabelanbindung wurden in den Spezifikationen definiert. Die Außenbefestigung muss nach neuesten Erkenntnissen noch einmal überarbeitet werden. Hier ist eine Optimierung der Führung von Schweißnähten erforderlich, um die geringstmögliche Beeinträchtigung der Gründungsstrukturen zu erhalten. Aufgrund der Wetterverhältnisse konnte die Inbetriebnahme des ersten Sonartransponder-Prototypen erst im April 2010 stattfinden.

Bei der Entwicklung des zweiten Sonartransponders wurden die aktuellen oben beschriebenen Spezifikationen vollständig umgesetzt. Die größte Herausforderung war hierbei die Realisierung des Quellpegels von 200dB re 1µPa in 1m (ein Faktor 16 in der Schallleistung) sowie die zusätzliche Verdopplung des Abstrahlwinkels.

Dies führte beim Schallwandler zu einer vollständigen Überarbeitung. Der Wandler wurde erheblich größer, was auch zu erheblich größeren anzunehmenden mechanischen Wellenlasten führte. Zusätzlich war die Abführung der beim Senden entstehenden Wärme eine erhebliche Herausforderung. Auch bestand die Gefahr, dass bei dieser hohen Sendeleistung Kavitation auftritt: Während der negativen

Halbschwingung der aktiven Fläche des Wandlers entsteht ein Druckminimum vor dem Wandler, so dass der Druck unter den Verdampfungsdruck der Flüssigkeit fällt. Es bilden sich Gas- und Dampfblasen, die bei wieder zunehmendem Druck unter hoher Temperaturentwicklung kollabieren und auf diese Weise zu einer Zerstörung der Oberfläche des Schallwandlers führen würden. Abschätzungen ergaben aber die Machbarkeit eines solchen Wandlers, so dass vorerst darauf verzichtet wurde, die hohe geforderte Schallleistung durch den Einsatz mehrerer getrennten Schallwandler zu realisieren. Dieser Lösungsansatz hätte zu einem erhöhten Installationsaufwand geführt, den die Industrie nur ungerne akzeptieren würde. Darüber hinaus entsteht die Problematik von Interferenz der Signale der beiden Schallwandler. Auch für die Steuereinheit wird es noch einmal wesentlich schwieriger werden, diese Sendeleistung auf – geplant - gleichem Raum unterzubringen.

Für die Experimente im Rahmen von Vorhabensteil A standen zu der Zeit 2 Sonartransponder mit unterschiedlichen Sendepegeln zur Verfügung. Die Experimente zur Untersuchung von Überlagerungseffekten wurden bei 188dB durchgeführt. Dies stellte kein Problem bei der Reichweite dar. Eine Umskalierung der Ergebnisse auf 200dB Sendeleistung war ohne Einschränkung möglich, da die Form des durch die Interaktion zweier Transponder hervorgerufenen Schallfeldes lediglich vom Unterschied der beiden Quellpegel und der Richtcharakteristiken der beiden Transponder abhängig ist, nicht aber von deren absoluten Quellpegeln.

Im Rahmen der Entwicklung und Fertigung des 200dB-Sonartranspondersystems THALES WISO ST 01 hat sich gezeigt, dass die Anforderungen eines Quellpegels 200dB re 1µPa in 1m fertigungstechnisch sehr schwer umzusetzen waren. Dies hat die Wehrbereichsverwaltung zum Anlass genommen, am 09.07.2010 eine Toleranzgrenze von 200dB +/- 3dB bekannt zu geben. Diese Toleranzgrenze wurde bei der Vermessung des Sonartransponders in der Messstelle Plön der WTD71 der Bundeswehr am 06.07.2010 mit einem Spitzenwert von 198 dB erreicht. Bei der Vermessung hat sich gezeigt, dass neben dem Erreichen des geforderten Quellpegels von 200dB re 1µPa in 1m auch die für den Windpark *alpha ventus* Winkelabdeckung von 180° fertigungstechnisch problematisch war. Im Test wurde eine Winkelabdeckung im Bereich von 120° erreicht. Auf den letzten 30° fiel der Sendepegel auf beiden Seiten um 7 dB ab. Aufgrund der Forderung der Wehrbereichsverwaltung, dass im Rahmen des Genehmigungsverfahrens die Anzahl der zu verwendenden Sonartranspondersysteme im Einzelfall unter Bezug auf die Form und Lage des Windparks zu entscheiden ist, können im Bedarfsfall aufgrund der kompakten Bauweise des Systems auch mehrere Systeme an einem Gründungskörper installiert werden.

Am 29.07.2010 wurde das Sonartranspondersystem auf das Arbeitsschiff *Satisfaction* gebracht. Am 03.08.2010 wurde seitens mit den Installationsarbeiten an der AV12 begonnen.

Diese erste Messphase fand bei gutem Wetter statt, so dass die Systeme per Hand von auf den betreffenden Anlagen anwesenden THALES Mitarbeitern ausgelöst wurden. Die zeitliche Abstimmung mit den messenden Instituten und den vort Ort tätigen Tauchern wurde über Betriebsfunk realisiert. Das ISD und das DEWI haben mit jeweils 2 Hydrofonen in 5,10,15 und 20m Tiefe gemessen. Das ITAP brachte eine Messboje auf der Hauptachse in 450m Entfernung zur AV 12 aus. Die Messkampagne fand vom 11-13.10.2010 statt. Hierbei konnte der Wandler an der AV12 hinsichtlich Richtcharakteristik, Ausbreitungsverlusten und empfangsseitiger Empfindlichkeit vermessen werden. Die Messergebnisse bestätigten, dass die Empfehlungen der Bundeswehr bei gutem Wetter eingehalten wurden. Bei einem weiteren Projekttreffen am 03.11.2010 kam man überein, dass eine zweite Messkampagne notwendig sei, um die noch offenen Punkte der Vermessung des Wandlers an der AV12 bei schlechtem Wetter, der Vermessung des bis dato noch nicht aktivierten ersten Prototypen an AV10 sowie der messtechnischen Untersuchung von Überlagerungseffekten zu bearbeiten. Da die Vermessung bei schlechtem Wetter ein Übersteigen von Personal auf die betreffenden Fundamente nicht zuließ, wurde entschieden, eine VPN Fernsteuerung der Systeme zu installieren. Die zweite Messkampagne konnte vom 22-23.02.2010 bei Windstärke 5-6 in Böen 7Bft durchgeführt werden.

#### 2.5 Messtechnische Überprüfung der Transponderspezifikationen

#### von Ole Ehrt (THALES Instruments)

Beide Systeme wurden von der Bundeswehr messtechnisch überprüft. Ging es bei der Überprüfung des Prototypen lediglich darum, ob der Quellpegel überhaupt erreichbar wird, wurde das zweite System THALES WISO ST 01 durch die WTD71 mit dem Ziel vermessen herauszufinden, ob die Empfehlungen der Bundeswehr aus 2004 umgesetzt werden konnten. Getestet wurden neben dem Sendepegel die horizontale Winkelabdeckung, die Frequenz des Sendesignals, die Aktivierbarkeit des Systems, die Pulslänge, der Anstieg des Sendepegels bis zum fünften Signal (Softsart) sowie die Zeitverzögerung des Antwortsignals. Hierzu wurde der Schallwandler in 10m Entfernung zu einem Hydrofon an einer Dreheinrichtung fixiert.



Abb. 8: Messtechnische Überprüfung der Spezifikation (Quelle: (WTD71 2010)

Die Einbautiefe betrug 4,5m bei einer Wassertiefe von 11m. Mit Hydrofon 1 wurde der Signal-Geräusch-Abstand des Aktivierungssignals bestimmt und die Verzögerung des Antwortsignals nach dem Empfang des Aktivierungssignals gemessen.

Der Antwortpegel des Transpondersystems wurde ausgehend von der an Hydrofon 2 gemessenen Empfangsspannung unter Einbeziehung der Verstärkung, der Empfindlichkeit des Hydrofons und des Ausbreitungsverlustes für die Laufstrecke von 10m berechnet:

A= 20 log10(Ue/1V)-V-M-20log10(10m/1m)

Hier sind: A Antwortpegel in dB relµPa
- Ue Empfangsspannung in Veff
- V Verstärkung in dB
- M Empfindlichkeit des Referenzhydrofons in dB rel 1V/µPa

Die Verstärkung betrug 40dB, die Empfindlichkeit des Hydrofons 2 im Frequenzbereich 7-9 kHz beträgt -219,5dB rel  $1V/\mu$ Pa (WTD71 2010).

Die Vermessung durch die WTD 71 ergab, dass das Sonartranspondersystem in einem Winkelbereich von 120° den empfohlenen Spezifikationen entspricht.

# 2.6 Installation der Transponder im Testfeld alpha ventus

## 2.6.1 Onshore-Installation des Transponders an AV10

## von Ole Ehrt (THALES Instruments)

Die Schallwandler des Sonartranspondersystems wurden auf halber Wassertiefe (+/- 10%) angebracht. Während der spätere Sonartransponder THALES WISO ST 01 auf See durch Taucher installiert wurde, wurde der Laborprototyp THALES PROTOTYP 01 an Land an das Fundament der AV10 angebracht. Hierfür waren zwei keilförmige Halterungen an das Fundament angebracht worden, in die der Schallwandler unter Zuhilfenahme von professionellen Kletterern und eine Autokrans eingehängt und verschraubt wurde.



Abb. 9: Installierter Schallwandler an AV 10

Der Vorteil dieser Installationsvariante liegt in der deutlich kostengünstigeren Installation des Transponders, sowie die Möglichkeit das Steuerungskabel gezielt verlegen zu können. Es wurde unter Berücksichtigung des Biegeradiuses des Kabels mithilfe von seewasserbeständigem Abdeckmaterial an der Aussenwand des Tripods in Richtung der nächstgelegenen druckwasserdichten Kabelführung verlegt. Im Inneren des Tripods war die Verlegung des Kabels entlang der Schwachstromkabel möglich. So konnte sichergestellt werden, dass ein ausreichender Abstand zu den Starkstromkabeln gegeben ist. Das Kabel wurde dann unterhalb der Luke der obersten Plattform aufgeschossen und für die Installation und den Anschluss der Steuereinheit auf See gesichert.



Abb. 10: Querschnitt durch Tripod unterhalb Standort Steuergerät auf P9

Nach der Installation der Windkraftanlage wurde das Steuergerät im April 2010 auf der Ebene P9 installiert. Hierzu wurde das Steuerungskabel durch einen freien Flansch linksseitig der inneren Treppe geführt und an das Steuergerät angeschlossen. Das Steuergerät selbst wurde in einem abschließbaren Schaltschrank untergebracht und an das 230V Versorgungsnetz der Anlage angeschlossen. Während der ersten Messkampagne befanden sich THALES Mitarbeiter zum Auslösen der Signale auf der Windkraftanlage und griffen direkt auf den internen PC der Steuereinheit zu. Für die später folgende zweite Messkampagne wurde eine Fernsteuerung eingebaut, um die Systeme in jeder Wettersituation ansprechen zu können.



Abb. 11: Steuergerät Prototyp im Schaltschrank

#### 2.6.2 Offshore-Installation des Transponders an AV12

#### von Ole Ehrt (THALES Instruments)

Die Offshore-Installation des 200dB Systems gestaltete sich ungleich schwieriger. Im Gegensatz zur Installation an Land mussten geeignete Schiffskapazitäten sowie die erforderlichen Tidefenster gefunden werden um das System sicher installieren zu können. Durch die Veränderung des Schallwandlers kam ebenfalls eine neue Montageplatte zum Einsatz, welche an die während des Fundamentbaus angebrachte Halterung angepasst werden musste.

Die Montageplatte erfüllt neben der reinen Befestigung auch die Funktion der elektrischen und akustischen Isolierung.



Abb. 12: Montage des Schallwandlers mit Montageplatte an vorbereiteten Halterungen

Die Installation wurde im Sommer 2010 im Rahmen mehrerer Tauchgänge durchgeführt. Hierbei konnte der Schallwandler erfolgreich innerhalb einer Tauchtide installiert werden. Für das Verlegen des Steuerkabels wurden mehrere Tauchtiden benötigt da es aufgrund der Offshore-Installation zu

einem aufwändigeren Verfahren kam. In der Planung war man davon ausgegangen, dass es möglich sei, einen Taucher in den Tripod tauchen zu lassen um das Steuerkabel entgegennehmen und verlegen zu können. Aufgrund der Wellenbewegungen als zu gefährlich eingestuft.

In einem ersten Schritt wurde die druckwasserdichte Kabeldurchführung unter Wasser entfernt um das Steuerkabel nach innen in den Tripod führen zu können. Am Kabel selbst wurde ein schwimmfähiger Gegenstand befestigt. Dieser Gegenstand wurde im Inneren an der Wasseroberfläche von einem Mitarbeiter aufgenommen und das Kabel entsprechend der Installation des Systems auf der AV10 entlang den üblichen Kabelführungen durch den Flansch auf die Ebene P9 geführt. Der Schaltschrank mit dem Steuergerät wurde direkt oberhalb des Flansches positioniert und an das Stromnetz der Anlage angeschlossen.



Abb. 13: Installiertes Steuergerät auf AV 12

# 2.6.3 Installation der Remote-Verbindungen

## von Ole Ehrt (THALES Instruments)

Um die Systeme auch unter widrigen Umgebungsbedingungen testen zu können, bei denen kein Übersteigen auf die Windkraftanlage möglich ist, wurde eine Verbindung der Rechner über das interne Netzwerk realisiert. Hierzu wurden seitens des Betreibers VPN Zugänge zu den Steuergeräten geschaffen. Zusätzlich wurden Netzwerksteckdosen eingebaut. um die Geräte nach Beendigung der Messkampagne sicher deaktivieren zu können. Nach einem erfolgreichen Test wurden die Zugänge für den Zeitraum der zweiten Messkampagne aktiviert und nach Beendigung derselben deaktiviert.

## 2.6.4 Empfehlungen zur Installation

#### von Ole Ehrt (THALES Instruments)

Da im Rahmen des Forschungsprojektes lediglich Halterungen an Tripods getestet werden konnten welche einem Wellenschlag von ca. 4 KN standhalten sollen, lässt sich an dieser Stelle lediglich eine Aussage über die Installationsprozesse an dieser Fundamente treffen. Es gibt derzeit keine Erkenntnisse zur Übertragung des Installationsprozesses auf andere Fundamente.

Bei der Anbringung der Schallwandler muss darauf geachtet werden, dass keine Abschattung durch Streben etc. entsteht. Deshalb ist es gemeinsam in allen Installationsprozessen, dass die Halterungen an der Außenwand des Fundamentes vor der Installation der Schallwandler eingebracht werden müssen, dabei muss auch darauf geachtet, dass der Schallwandler horizontal installiert wird. Vor der Fertigung der Fundamente müssen geeignete Wege zur Kabelführung festgelegt werden (z.B. Kabelschutzrohr, Kabeldurchführung etc.). Ein nachträglicher Einbau auf See ist entweder kostenintensiv oder in den meisten Fällen unmöglich. Um das Risiko einer Beschädigung der empfindlichen Sensorik während der Rammung der Fundamente zu vermeiden, ist die kostenintensive Installation auf See vorzuziehen. Allerdings müssen hier oben beschriebene Lösungen zum Verlegen der Kabel im Vorwege getroffen worden sein. So ist es z.B. denkbar ein Kabelschutzrohr im Vorfeld zu installieren, welches breit genug ist um ein Kabel mitsamt Stecker aufnehmen zu können. Das Rohr sollte knickfrei sein. Dies ermöglicht die Durchführung eines Installationsdrahtes aus dem Fundament hinaus an welchen das zu installierende Steuerkabel mittels eines Kabelschuhs befestigt werden kann. Auf Freigabe des Tauchers hin kann so das Kabel in das Fundament eingezogen werden und ist durch das Rohr gleichzeitig gegen Wellenschlag geschützt.

Um die Installation für die Taucher zu vereinfachen ist angedacht, die Montageplatte mit einer zusätzlichen Befestigungsmöglichkeit für einen Schwimmsack oder einen Kranhaken zu versehen.

Die Steckverbindung zum Schallwandler sollte unter Wasser steckbar sein, da der Antifoulinganstrich spätstens nach zwei Jahren erneuert werden muss, und daher muss der Schallwandler aus dem Wasser rausgenommen werden. Es ist Empfehlungswert hier einen Ersatz Schallwandler direkt einzubauen, da die Erneuerung der Antifoulinganstrich mehrere Tage in Anspruch nimmt.

# 2.7 Wartung der Schallwandler

## von Ole Ehrt (THALES Instruments)

Das Steuergerät des Schallwandlers ist aufgrund seines fest implementierten Selbsttestes wartungsfrei. Dies gilt jedoch nicht für den Schallwandler, dessen Antifouling aufgrund der Umweltbedingungen nach spätestens zwei Jahren erneuert werden muss. Um eine zu starke Dämpfung des Signals zu vermeiden sollte der Schallwandler des Weiteren in regelmäßigen Abständen (Empfehlung: 6-9 Monate) von Bewuchs befreit werden. Dies ist sowohl durch Taucher als auch durch marktübliche ROVs möglich.

## 2.8 Zusammenfassung und Diskussion

## von Ole Ehrt (THALES Instruments)

Das Ziel des Forschungsprojektes eine Sonartransponderkonfiguration, welche in Notfallsituationen eine zuverlässige akustische Kenntlichmachung von Offshore-Windparks für U-Boote bietet und gleichzeitig Schädigungen an Meeressäugern vermeidet bzw. weitestgehend gering hält, konnte mit dem Transpondersystem THALES WISO ST 01 erreicht und durch die Messkampagnen bei unterschiedlichen Wettersituationen belegt werden. Obwohl durch die relativ kurzen Messkampagnen nur Momentaufnahmen der Einwirkung auf die marine Umwelt gemacht werden konnten, kann auf eine langfristige Umweltverträglichkeit des Systems geschlossen werden, da das System durch ein U-Boot nur in Notfallsituationen wie im Falle von mittelschwerer See mit Radarverlust aktiviert werden würden. Somit ist von einer erheblich geringeren Einwirkung auf Meeressäuger zu rechnen als während der konzentrierten Aktivierung während der Messkampagnen. Die Gespräche über die Notwendigkeit des relativ hohen Sendeschalls von 200db mit der Bundesmarine und weiteren Anspruchsgruppen wie z.B. Tauchern und Umweltbehörden werden fortgeführt, wobei hier das Retten von Menschenleben im Falle einer Havarie deutlich im Vordergrund steht.

# 3 Akustische Modellbildung und Simulation (FKZ 0325104A)

# 3.1 Einführung

# von Moritz Fricke (ISD)

Neben den in Kapitel 4 beschriebenen Messungen im Testfeld *alpha ventus* wurde in diesem Vorhaben ein Modell für die Schallausbreitung des aktivierten Sonartransponders entwickelt, das zum einen eine Simulation der Übertragungsverluste unter unterschiedlichen Wetterszenarien und zum anderen Aussagen über die Richtcharakteristik des installierten Schallwandlers ermöglicht.

Im Rahmen der akustischen Modellbildung wurde das Ziel verfolgt, die Umgebungsparameter auf der Grundlage physikalischer Zusammenhänge in das Modell einzubeziehen, um die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Schallabstrahlung und -ausbreitung zu identifizieren. Die Berechnung der Schallabstrahlung wurde mithilfe der Randelemente-Methode (BEM) durchgeführt. Die Ergebnisse liegen nach diesem Schritt in Form von vertikalen und horizontalen Richtcharakteristiken vor. Für die Simulation der Schallausbreitung wurde ein dreidimensionaler Ray-Tracing-Algorithmus implementiert, der als Eingangsdaten die Ergebnisse der Schallabstrahlungsberechnung verarbeitet. In die Schallausbreitungssimulation gehen ferner die Umgebungsparameter Schallgeschwindigkeitsprofil, Blaseneintrag durch Wind und Wellen, Rauigkeit der Wasseroberfläche durch Wellengang sowie Bodenbeschaffenheit ein.

Aus den erzielten Simulationsergebnissen bezüglich der Richtcharakteristik und den entfernungsabhängigen Übertragungsverlusten wurden im Vorhaben die Anforderungen an die durchzuführenden Messungen sowie geeignete Messpunkte abgeleitet.

# 3.2 Theoretische Grundlagen

von Moritz Fricke (ISD)

# 3.2.1 Akustische Einflussgrößen und ihre Abbildung im Modell

# 3.2.1.1 Impedanz und Intensität

Zum besseren Verständnis der akustischen Zusammenhänge und der verfolgten Simulationsverfahren wird im Folgenden eine kurze Einführung der verwendeten Begriffe und Gleichungen gegeben.

In einer ebenen Schallwelle im Wasser werden die Wassermoleküle orts- und zeitanhängig mit einer Schnelle v aus ihrer Ruhelage ausgelenkt. Durch die zeitvariante lokale Verdichtung bzw. Verdünnung des Wassers entsteht ein ebenfalls orts- und zeitabhängiger Schallwechseldruck p, der sich dem hydrostatischen Druck überlagert und im Falle der ebenen Welle mit der Schnelle konphas ist. Der Quotient

$$Z = \frac{p}{v} = \rho_0 c \quad (\approx 1500 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \text{ für Wasser}); \ [Z] = \frac{Ns}{m^3}$$

wird als Wellenwiderstand oder akustische Impedanz des Mediums bezeichnet. Eine weitere wichtige Größe ist die akustische Intensität, für die im Falle einer ebenen Welle

$$I = p \cdot v = \frac{p^2}{\rho_0 c} ; [I] = \frac{Nm}{m^2 s} = \frac{W}{m^2}$$

gilt. Die Impedanz gibt die flächenbezogene Wirkleistung an, die in der Welle transportiert wird.

#### 3.2.1.2 Reflexion

Für die Reflexion einer Schallwelle am Übergang zwischen zwei unterschiedlichen Medien (z.B. Wasser-Luft, Wasser-Boden) ist der Unterschied zwischen den Impedanzen beider Medien von Bedeutung. Trifft eine Schallwelle auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien unterschiedlicher Impedanzen, so wird ihre Intensität zu einem Anteil von

$$\left|\alpha_{r}\right| = \left|r^{2}\right| = \left|\frac{I_{r}}{I_{e}}\right|$$

reflektiert.  $\alpha_r$  wird als Reflexionsgrad bezeichnet. Die Größe *r* wird als Reflexionsfaktor bezeichnet. Der Reflexionsfaktor gibt das Verhältnis zwischen den Schalldruckamplituden der einfallenden und der reflektierten Welle an.

Der Reflexionsfaktor ist im Allgemeinen abhängig von der Einfallsrichtung der Schallwelle auf die reflektierende Grenzfläche. Trifft eine Schallwelle, die sich in einem Medium 1 mit der Impedanz  $Z_1$ ausbreitet, unter einem Winkel von  $\theta_1$  zur Flächennormalen auf eine ebene Grenzfläche zu einem Medium 2 mit der Impedanz  $Z_2$ , so berechnet sich der Reflexionsfaktor nach (Lerch u. a. 2008) zu

$$r = \frac{Z_2 \cos(\theta_1) - Z_1 \sqrt{1 - \left(\frac{c_2}{c_1} \sin(\theta_1)\right)^2}}{Z_2 \cos(\theta_1) + Z_1 \sqrt{1 - \left(\frac{c_2}{c_1} \sin(\theta_1)\right)^2}}$$

Aufgrund des hohen Impedanzunterschiedes zwischen Wasser und Luft findet an der Wasseroberfläche eine näherungsweise vollständige Reflexion statt. Die Wasseroberfläche ist aus der Richtung des Wasserkörpers als schallweiche Grenzfläche zu betrachten. Der Impedanzunterschied zwischen Meeresboden und Wasser ist jedoch erheblich kleiner und wesentlich von der Sedimentbeschaffenheit abhängig.

Tab. 6 ist ein Auszug typischer Kennwerte für kontinentale Randmeere zu entnehmen.

| Sedimenttyp            | Relative<br>Dichte  | Relative<br>Schallge-<br>schwindigkeit | Impedanz-<br>sprung | Reflexions-<br>grad | Transmissions-<br>maß<br>$\alpha_t = 1 - \alpha_r$ |
|------------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|--|
|                        | $\rho_2/\rho_1 = m$ | $c_2/c_1 = 1/n$                        | $Z_2/Z_1$           | $\alpha_r$          | $10\log(\alpha_t)/dB$                              |
| Kontinentales Randmeer |                     |  |                     |                     |  |
| Grober Sand            | 1,99                | 1,20                                   | 2,38                | 0,16                | -0,79  |
| Feiner Sand            | 1,90                | 1,15                                   | 2,18                | 0,13                | -0,64  |
| Sehr feiner Sand       | 1,82                | 1,12                                   | 2,04                | 0,12                | -0,54  |
| Schlammiger Sand       | 1,74                | 1,08                                   | 1,88                | 0,09                | -0,42  |
| Sandiger Schlick       | 1,74                | 1,08                                   | 1,88                | 0,09                | -0,42  |
| Schlick                | 1,71                | 1,06                                   | 1,81                | 0,083               | -0,38  |
| Sand Schlick Lehm      | 1,56                | 1,03                                   | 1,61                | 0,055               | -0,24  |
| Lehmiger Schlick       | 1,46                | 1,01                                   | 1,47                | 0,036               | -0,16  |
| Schlammiger Lehm       | 1,39                | 0,994                                  | 1,38                | 0,025               | -0,11  |

 Tab. 6: Kennwerte für verschiedenen Sedimentarten für kontinentale Randmeere (Quelle: (Urban 2002))

In dem in diesem Bericht betrachteten Untersuchungsgebiet im Bereich des Windparks *alpha ventus* liegt überwiegend Feinsand mit ein einer glatten bis feingerippten Oberfläche vor, so dass für die Berechnungen ein Impedanzverhältnis von 2,1 angenommen wurde.

#### 3.2.1.3 Beugung

Trifft eine Schallwelle auf ein endlich ausgedehntes Hindernis, so entsteht eine Beugungswelle, die vom Hindernis ausgeht und sich dem ungestörten Schallfeld überlagert. Durch (teilweise) destruktive Interferenz zwischen Beugungswelle und ungestörtem Schallfeld bildet sich hinter dem Hindernis ein Schatten, der umso ausgeprägter ist, je größer das Hindernis im Vergleich zur Wellenlänge ist. Grundsätzlich sind in der Akustik nicht die absoluten Abmessungen von Hindernissen, Gehäuse-Öffnungen oder Membranen interessant, sondern stets das Verhältnis aus absoluten Abmessungen zur Wellenlänge. Zur Abschätzung der Beeinflussung eines Schallfeldes durch ein Hindernis wird daher in der Regel das Produkt

$$k \cdot a = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a$$

gebildet. Darin ist k die Kreiswellenzahl und a die absolute Abmessung eines Hindernisses. Für ka <<1 ist ein Hindernis sehr klein im Verhältnis zur Wellenlänge und beeinflusst das Schallfeld nur unwesentlich. Bei einem Produkt ka >>1 findet eine empfindliche Beeinflussung der Schallfeldes statt. Das Hindernis kann nicht mehr als klein im Verhältnis zur Wellenlänge angesehen werden. Betrachtet man den in diesem Vorhaben betrachteten Tripod mit einem Durchmesser des Hauptrohres von ca. 6 m, so ergibt sich bei einer Wellenlänge ca. 20 cm ein Verhältnis von  $ka \approx 190$ , so dass die Gründungskonstruktion als Hindernis für die Schallausbreitung zu betrachten ist.

#### 3.2.1.4 Brechung

Der Begriff Brechung bezeichnet die Veränderung der Ausbreitungsrichtung einer Welle beim Übergang zwischen zwei Medien ungleicher Schallgeschwindigkeiten. Trifft eine Schallwelle, die sich in einem Medium 1 mit der Schallgeschwindigkeit  $c_1$  ausbreitet, unter einem Winkel  $\theta_1$  zur Flächennormalen auf eine Grenzfläche zu einem Medium 2 mit der Schallgeschwindigkeit  $c_2$ , so breitet sie sich im Medium 2 in einer veränderten Ausbreitungsrichtung aus, nämlich unter dem Winkel  $\theta_2$  zur Flächennormalen. In Abb. 14 ist dieser Zusammenhang schematisch dargestellt.



Abb. 14: Reflexion und Brechung an einer Grenzschicht

Für die Ausbreitung von Unterwasserschall ist Brechung ein wesentlicher Mechanismus. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser ist abhängig von hydrostatischem Druck, Salzgehalt und Temperatur. Der hydrostatische Druck ist wiederum abhängig von der Tiefe. Salzgehalt und Temperatur sind im Allgemeinen ebenfalls nicht konstant über der Tiefe. So ergibt sich eine tiefenabhängige Schallgeschwindigkeit, das sogenannte Schallgeschwindigkeitsprofil. Abb. 15 zeigt vier verschiedene Schallgeschwindigkeitsprofile aus (Nissen 2004), die für die in diesem Vorhaben durchgeführten Berechnungen angenommen wurden, um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen (ebd.) sicherzustellen.



Abb. 15: Angenommene saisonale Schallgeschwindigkeitsprofile (Quelle: )

Ein gedachter Schallstrahl, der den Ausbreitungsweg einer Schallwelle beschreibt, erfährt durch das stetige Schallgeschwindigkeitsprofil eine kontinuierliche Brechung. Die dadurch hervorgerufene Krümmung des Schallstrahls ist umso größer, je größer der Schallgeschwindigkeitsgradient ist. Betrachtet man einen Schallstrahl, dessen Startpunkt und –richtung bekannt ist, so liegt bei ebenfalls bekanntem Schallgeschwindigkeitsprofil mathematisch gesehen ein Anfangswertproblem vor. Die Lösung, die in diesem Fall den Verlauf des Schallstrahls beschreibt, kann mithilfe numerischer Verfahren genähert werden. Das hier eingesetzte Verfahren ist das klassische Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung. Auf den Einfluss des Schallgeschwindigkeitsprofils wird im Rahmen der Diskussion der Simulationergebnisse näher eingegangen.

#### 3.2.1.5 Streuung

Zur Erläuterung der Begriffe Reflexion und Brechung wurde bisher von ideal glatten Oberflächen ausgegangen. An glatten Oberflächen wird Schall spiegelnd reflektiert, d.h. der Austrittswinkel ist gleich dem Einfallswinkel und die gesamte Schallintensität wird in spiegelnde Richtung reflektiert. In der Regel weisen Oberflächen jedoch eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Rauigkeit auf. Der Schall wird an rauen Oberflächen streuend reflektiert. Auch hier ist wieder das Verhältnis zwischen den Texturabmessungen der Oberfläche und der Wellenlänge von Bedeutung. Bei tiefen Frequenzen führt eine gegebene Oberflächenrauigkeit zu einer weniger stark ausgeprägter Streuung als bei hohen Frequenzen. Zur Bewertung der Rauigkeit einer Oberfläche wird häufig der Rayleigh-Parameter

#### $R = 2k \cdot h \cdot \cos \theta$

herangezogen. Darin ist *k* die Kreiswellenzahl, *h* die effektive Rauigkeit der Oberfläche und  $\theta$  der Einfallswinkel zur Flächennormalen. Die Fläche ist als glatt anzusehen, wenn *R* << 1 gilt. Für Große Werte (*R* >> 1) ist die Streuung groß. Das gestreute Schallfeld ist dann diffus.

Für die Ausbreitung von Wasserschall ist die Streuung an der im Allgemeinen rauen Wasseroberfläche von großer Bedeutung. In (Brekhovskikh und Lysanov 1982) ist das sogenannte Tangentialebenen-Verfahren für die Näherung der Streucharakteristik in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit beschrieben. Für diese Näherung wird eine Normalverteilung der Höhenabweichungen der Wasseroberfläche von der ideal glatten gemittelten Begrenzungsebene angenommen. Zur Berechnung der Reflexion eines infinitisimal dünnen Schallstrahls ist auf einer rauen Oberfläche der Normalenvektor oder die Tangentialebene erforderlich. Für die Richtung des Normalenvektors lässt sich auf Basis der angenommenen normalverteilten Höhenabweichungen der Wasseroberfläche eine Wahrscheinlichkeitsfunktion ableiten, aus der eine Wahrscheinlichkeitsfunktion für die Reflexionsrichtung eines Schallstrahls ermittelt wird. Die Reflexionsrichtung wird dabei relativ zur spiegelnden Reflexionsrichtung definiert und sei hier als  $\Delta\theta$  bezeichnet. Für die genaue Herleitung dieses Ansatzes sei auf (Brekhovskikh und Lysanov 1982) verwiesen. In Abb. 16 ist der Quotient aus gestreuter Intensität und Intensität in spiegelnder Richtung in Abhängigkeit von  $\Delta\theta$  dargestellt.



Abb. 16: Relative Streucharakteristik für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten (Berechnung nach (Brekhovskikh und Lysanov 1982))

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit ein breiteres Streubild auftritt, die Schallwellen also zunehmend diffus reflektiert werden.

#### 3.2.1.6 Absorption

Ein weiterer im Bereich des Wasserschalls wichtiger Mechanismus ist Absorption. Mit Absorption wird die Umwandlung der Schallleistung einer Welle in thermische Energie bezeichnet. Die Intensität einer Schallwelle, die sich in einem absorbierenden Medium ausbreitet, nimmt exponentiell mit dem Ausbreitungsweg ab. Es gilt

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\beta x}$$

Darin ist  $I_0$  die Intensität an der Stelle x = 0. Die Größe  $\alpha$  wird als Absorptionskoeffizient bezeichnet und ist im Allgemeinen frequenzabhängig. Mit zunehmender Frequenz steigt die Absorption an. In dem in diesem Vorhaben betrachteten Frequenzbereich von 7-8 kHz liegt der Absorptionskoeffizient von Seewasser bei etwa 0,7 dB/km. Durch oberflächennahe Luftblasen, die bei starkem Wind und großer Wellenhöhe in das Wasser eingetragen werden, steigt der Absorptionskoeffizient in diesem Bereich jedoch erheblich an. In (Ainslie 2005) und (Novarini und Bruno 1982) wird ein modellbasierter Ansatz zur Berechnung des tiefenabhängigen Absorptionskoeffizienten infolge von Wind vorgestellt, der hier im Rahmen der Modellbildung zur Abbildung des Blaseneintrages infolge von Wind zur Anwendung kam. Abb. 17 zeigt den Zusammenhang zwischen Absorptionskoeffizient und Wassertiefe für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten.



Abb. 17: Tiefenabhängiger Absorptionskoeffizient infolge Blaseneintrag

## 3.2.2 Schallabstrahlung und -empfang elektroakustischer Wandler

Der Begriff Schallwandler bezeichnet allgemein einen elektroakustischen Wandler, d.h. einen Sender und/oder Empfänger. In dem im Teilprojekt FKZ 0325104B entwickelten Sonartransponder wird ein sogenannter bidirektionaler Schallwandler eingesetzt, der sowohl in Sende- als auch in Empfangsrichtung betrieben werden kann. Die bei einem Schallwandler schwingende Oberfläche wird als aktive Fläche oder Membran bezeichnet.

Jeder reale Schallwandler besitzt eine geometriebedingte Richtcharakteristik. Als Richtcharakteristik wird die Richtungsabhängigkeit der abgestrahlten Intensität bezeichnet. Die geometriebedingte Richtcharakteristik ergibt sich u.a. aus der Membran- bzw. Gehäusegeometrie. Je größer die Hauptmessungen der Membran im Verhältnis zur Wellenlänge des abgestrahlten bzw. empfangenen Schalls sind, desto stärker ist die Richtcharakteristik ausgeprägt. Auch hier wird zur Abschätzung der Richtcharakteristik das in 3.2.1.3 eingeführte Produkt *ka* betrachtet, wobei *a* hier die Hauptabmessung der Membran ist. Zu der beschriebenen geometriebedingten Richtcharakteristik kommt meist eine einbaubedingte Einschränkung der Richtcharakteristik hinzu. Bezüglich des Schallwandlers des Sonartransponders kommt diese durch die Installation des Schallwandlers an der Gründungskonstruktion der Windenergieanlage zustande.

Richtcharakteristiken werden in der Regel in Form von Polar-Diagrammen dargestellt. Der Radius, den die Kurve darin beschreibt, gibt die Intensität an, die in der jeweiligen Richtung bezogen auf die Hauptrichtung abgestrahlt wird. Abb. 18 zeigt die Richtcharakteristik einer kreisförmigen Kolbenmembran für unterschiedliche Frequenzen. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Frequenz, also zunehmendem *ka* die Ausprägung der Richtcharakteristik zunimmt. Für den Schallwandler des Transpondersystems THALES WISO ST01 gibt sich für die horizontale Abmessung  $ka \approx 27$ , so dass nicht von einer omnidirektionalen Abstrahlung ausgegangen werden kann.



Abb. 18: Richtcharakteristik einer kreisförmigen Kolbenmembran für ka=0.1..10

#### 3.2.3 Sonar-Gleichungen

Die Sonar-Gleichungen wurden zuerst während des Zweiten Weltkrieges formuliert, um eine logische Grundlage für die Abschätzung von Signal-Reichweiten und die Leistungsfähigkeit von Sonarsystemen zu schaffen. In der Grundform lässt sich die Sonar-Gleichung als

$$SNR_{Empfänger} = SL_{Sender} - TL - NL_{Empfänger} + DI_{Empfänger}$$

schreiben. Darin ist  $SL_{Sender}$  der Quellpegel (*source level*) des Senders, *TL* der Übertragungsverlust (*transmission loss*),  $NL_{Empfänger}$  der Störgeräuschpegel (*noise level*) am Ort des Empfängers und  $DI_{Empfänger}$  der Richtfaktor (*directivity index*) der Quelle. Entscheidend für die Detektierbarkeit des Signals durch den Empfänger ist der Signal-Rausch-Abstand *SNR* am Ort des Empfängers. Für die Detektierbarkeit des Signals mit einer einfachen Signalverarbeitung sollte der *SNR* mindestens 10 dB betragen.

In der Situation eines Notfalls wird zunächst ein Aktivierungssignal vom Uboot gesendet. Für diesen Fall lässt sich die Sonar-Gleichung in der Form

$$SNR_{Transponde} = SL_{Uboot} - TL - NL_{Transponde} + DI_{Transponde}$$

darstellen. Nach der Aktivierung des Transponders antwortet dieser in der Gegenrichtung. Es gilt also

$$SNR_{Uboot} = SL_{Transponde} - TL - NL_{Uboot} + DI_{Uboot}$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Richtfaktor nur beim Empfang durch das Uboot von Bedeutung ist, da die Empfangscharakteristik schwenkbar ist und so in Richtung eines Senders ausgerichtet werden kann. Es ist leicht nachvollziehbar, dass diese Möglichkeit bei der starren Anbringung des Transponder-Schallwandlers nicht möglich ist.

Den entscheidenden Einfluss auf die Detektierbarkeit des vom Transponder ausgesendeten Signals hat der Übertragungsverlust. Er ist sowohl von wetterunabhängigen Faktoren wie Sedimentbeschaffenheit und Bathymetrie als auch von wetterabhängigen Faktoren wie Streuung an der Wasseroberfläche, Absorption durch Blaseneintrag und Brechung durch das Schallgeschwindigkeitsprofil abhängig.

Ferner ist bei der Ermittlung des Signal-Rausch-Abstandes die betrachtete Bandbreite von Bedeutung. Formal ist der *SNR* in logarithmischer Schreibweise definiert als

$$SNR = 10\log_{10}\left(\frac{P_{Signal}}{P_{Rauschen}}\right)$$

*P* bezeichnet darin die Leistung des Nutzsignals bzw. des Rauschens. Die Leistung des Rauschens ist jedoch abhängig von der betrachteten Bandbreite. Eine schmalbandige Analyse des *SNR* liefert stets höhere Werte als eine breitbandige.

#### 3.3 Modellstruktur und eingesetzte Simulationsverfahren

von Moritz Fricke (ISD)

#### 3.3.1 Randelemente-Methode

Für die Berechnung der Richtcharakteristik des Schallwandlers bei freier Abstrahlung und in der Einbausituation an der Gründungsstruktur der Windenergieanlagen wurde im Rahmen des Vorhabens die Randelemente-Methode (BEM) eingesetzt. Wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist die BEM ein numerisches Berechnungsverfahren, das auf einer räumlichen Diskretisierung beruht. Im Gegensatz zur FEM wird bei der BEM nicht das gesamte Lösungsgebiet sondern nur dessen Rand diskretisiert. Für die Berechnung der Richtcharakteristik des Schallwandlers an der Gründungskonstruktion bedeutet das, dass lediglich die Oberflächen des Wandlers und der Gründungskonstruktion diskretisiert werden müssen und nicht, wie es beim Einsatz der FEM der Fall wäre, auch der umgebene Wasserkörper. Eine Berechnung mit der FEM wäre aufgrund der hohen Anzahl der benötigten finiten Elemente nicht oder nur unter erheblichem Rechenaufwand möglich. Bei akustischen Berechnungen gilt sowohl für die FEM als für die BEM der Richtwert, dass die Größe der Elemente etwa ein Zehntel der Wellenlänge betragen sollte. Da der Sonartransponder im Sendebetrieb bei 7-8 kHz arbeitet, ist die kleinste zu betrachtende Wellenlänge

$$\lambda_{\min} = \frac{c_{Wasser}}{f_{\max}} \approx 19 cm$$
.

Setzt man nun ein Sechstel der Wellenlänge an, so ergibt sich eine maximale Elementgröße von etwa 3 cm, die schon bei einer geringen Ausdehnung des betrachteten Wasserkörpers zu sehr hohen Elementzahlen führte.

Der wesentliche Vorteil der BEM gegenüber der FEM für diese Anwendung liegt jedoch darin, dass offene Gebiete keine speziellen Randbedingungen benötigen. Bei der Berechnung der Schallabstrahlung eines Wandlers in den unbegrenzten Raum mithilfe der FEM müssten an den Modellrändern nicht-reflektierende Randbedingungen gesetzt werden, da sonst künstliche Reflexionen zurück in das Lösungsgebiet auftreten würden. Nicht-reflektierende Randbedingungen in der FEM sind jedoch mit einem hohem Implementierungsaufwand verbunden.

Um den Rechenaufwand weiter zu verringern, wurde bei den durchgeführten Berechnungen der Richtcharakteristik die Symmetrie des Wandlers und seiner Anbringung an der Gründungskonstruktion genutzt. Ferner wurde nicht die gesamte Gründungskonstruktion abgebildet, sondern lediglich ein Ausschnitt mit einer Höhe von 2m, wie in Unterkapitel 3.4.1 erläutert wird.

#### 3.3.2 Ray-Tracing

Für die Berechnung der Ausbreitungsverluste in Entfernungen bis ca. vier Seemeilen wurde in diesem Vorhaben ein dreidimensionaler Ray-Tracing-Algorithmus implementiert. Ray-Tracing (Strahlen-Verfolgung) ist ein geometrisches Verfahren, das ursprünglich für die computergestützte Visualisierung entwickelt wurde. Seit den achtziger Jahren wird es jedoch auch im Bereich der virtuellen Raumakustik und der Hydroakustik eingesetzt, um die mittel- und hochfrequente Schallausbreitung zu simulieren.

Der Ray-Tracing-Ansatz beruht auf der Vorstellung von Schallstrahlen, die senkrecht zur Wellenfront stehen. Zu einem Zeitpunkt t=0 wird eine große Anzahl von Schallstrahlen von der Quelle aus gestartet. Der Weg jedes einzelnen Schallstrahls wird verfolgt, d.h. mögliche Schnittpunkte mit Raumbegrenzungen, in diesem Fall Meeresboden oder Wasseroberfläche, werden berechnet und der Weg des Schallstrahls nach einer Reflexion weiterverfolgt. In homogenen Medien, insbesondere Medien mit ortsunabhängiger Schallgeschwindigkeit, ist ein solcher Schallstrahl gerade. Wie bereits in Unterkapitel 3.2.1.4 erläutert wurde, ist diese Voraussetzung im Wasserkörper in der Regel nicht erfüllt. Der Weg des Schallstrahls muss daher in kleinen Schritten iterativ berechnet werden, indem nach jedem Schritt die aufgrund der Brechung hervorgerufene Richtungsänderung berechnet wird.



Abb. 19: Vereinfachter Programmablaufplan eines Ray-Tracing-Algorithmus (nach (Vorländer 2008))

Als veranschaulichendes Gedankenmodell stelle man sich vor, dass die Schallstrahlen die Flugbahn von Schallteilchen beschreiben. Diese Schallteilchen haben eine Startenergie und verlieren sowohl im Medium als auch bei Reflexionen an den Randflächen Energie. Um den Schalldruck an einem Ort im Raum bzw. die Übertragungsverluste zu diesem Punkt zu berechnen, sind sogenannte Detektorvolumina erforderlich, in denen die Anwesenheit der Schallteilchen detektiert und Ihre Energie aufsummiert wird. Für die Energiedichte am Ort eines Detektorvolumens gilt dann

$$w = \frac{\sum_{i=1}^{N} e_i}{V_d} \, .$$

Darin ist  $e_i$  die Energie des i-ten Schallteilchens und  $V_d$  das Volumen, innerhalb dessen sich die Schallteilchen befinden. Um den Wasserkörper räumlich aufzulösen und die Übertragungsverluste in unterschiedlichen Richtungen und Entfernungen berechnen zu können, ist der Ort und die Anzahl der Detektorvolumina frei wählbar. Für eine tiefergehende Beschreibung von Ray-Tracing-Algorithmen sei auf (Vorländer 2008) verwiesen. Abb. 19 zeigt schematisch den Programmablaufplan des Ray-Tracing-Algorithmus.

Die mithilfe der BEM berechneten Richtcharakteristiken werden in den Ray-Tracing-Algorithmus eingebunden, indem jedem gestarteten Schallteilchen eine richtungsabhängige Startenergie zugewiesen wird. Der Startpunkt aller Schallteilchen befindet sich dabei im Zentrum der Anordnung aus Wandler und Gründungskonstruktion. Die Quelle wird somit auf eine gerichtete Punktquelle reduziert. Die Startrichtung eines Schallteilchens wird dabei zufällig ermittelt.

# 3.4 Simulationsergebnisse zur Schallabstrahlung der Wandler

## von Moritz Fricke (ISD)

Zur Abbildung des Schallwandlers an der Gründungskonstruktion in der BEM-Simulation wurde die Vereinfachung vorgenommen, lediglich einen Ausschnitt von 2 m Höhe aus der Gründungskonstruktion zu verwenden. Diese Vereinfachung ist zulässig, da der Wandler aufgrund seiner großen Ausdehnung in vertikaler Richtung eine stark ausgeprägte Richtcharakteristik in der vertikalen Ebene aufweist. Abb. 20 zeigt die Anbringung des Wandlers an der Gründungskonstruktion und die Abbildung von Gründungskonstruktion und Wandler im Modell.



Abb. 20: Abbildung von Schallwandler und Tripod im BEM-Modell; (a) Installierter Schallwandler an AV10; (b) Tripod-Ausschnitt mit Schallwandler und Symmetrie-Ebene

In den folgenden Unterkapiteln wird zuerst die freie Schallabstrahlung der Wandler und im Anschluss daran die Schallabstrahlung der an der Gründungkonstruktion installierten Wandler vorgestellt. Dabei wird in der Darstellung unterschieden zwischen absoluten und relativen Richtcharakteristiken. Absolute Richtcharakteristiken geben die im Fernfeld simulierten bzw. gemessenen Schalldruckpegel bezogen auf die Referenz-Entfernung von 1 m an. Relative Richtcharakteristiken berechnen sich aus der absoluten Richtcharakteristik, in dem die richtungsabhängig simulierten bzw. gemessenen Schalldruckpegel auf den Schalldruckpegel in Hauptrichtung normiert werden.

#### 3.4.1 Freie Schallabstrahlung der Wandler

Bei der Simulation der freien Schallabstrahlung wird angenommen, dass der Wandler frei im Wasser hängt, d.h. es befindet sich keine Struktur in der Nähe des Wandlers, die die Schallabstrahlung beeinflussen würde. Ferner wird sowohl bei der freien Schallabstrahlung als auch bei der Schallabstrahlung der installierten Wandler angenommen, dass der Wasserkörper in vertikaler Richtung nicht durch Wasseroberfläche und Meeresboden begrenzt, sondern unendlich ausgedehnt ist. Die Abbildung von Reflexionen an den Grenzflächen wird, wie in Kapitel 3.3.2 erläutert, in der Ray-Tracing-Simulation berücksichtigt.



Abb. 21: Horizontale und vertikale Richtcharakteristiken der unterschiedlichen Wandlertypen

In Abb. 21 sind die Simulationsergebnisse für die horizontalen und vertikalen Richtcharakteristiken der beiden unterschiedlichen Wandler dargestellt. Zunächst sind die unterschiedlich breiten horizontalen Richtcharakteristiken der beiden Wandlertypen zu erkennen. Ferner wird deutlich, dass die für den Windpark *alpha ventus* geforderte Winkelabdeckung von 180° (-3 dB-Grenzwinkel) auch durch den zweiten Wandler nicht vollständig eingehalten wird, sondern etwa 125° beträgt.

Als Eingangsgröße für die Simulation mithilfe der BEM ist eigentlich die Oberflächenschnelle der Wandlermembran erforderlich, jedoch ist ihre messtechnische Bestimmung auch unter Laborbedingungen im Rahmen der Wandlerentwicklung mit einem großen Aufwand verbunden. Aus diesem Grund erfolgte eine Normierung der absoluten Richtcharakteristiken auf die während der Labormessungen ermittelten Schalldruckpegel in 1 m Entfernung in Hauptrichtung.

Der Wandler vom zweiten Typ (SL<sub>Nenn</sub> = 200dB) wurde im Auftrag der Firma THALES Instruments von der WTD71 vermessen. Die Vermessung ergab einen maximalen Sendepegel von ca. 198 dB re 1µPa in 1m auf der Hauptachse. Die Vermessung des ersten Prototypen (SL<sub>Nenn</sub> = 188dB) wurde durch die Firma Thales Instruments in einem Wassertank durchgeführt. Der Vergleich zwischen der gemessenen horizontalen Richtcharakteristik und den Simulationsergebnissen für die beiden Wandler ist in Abb. 22 dargestellt.



Abb. 22: Horizontale Richtcharakteristiken der unterschiedlichen Wandlertypen

#### 3.4.2 Schallabstrahlung der installierten Wandler

Da die Schallwandler in ihrer tatsächlichen Einbausituation nicht frei aufgehängt, sondern an der Gründungskonstruktion einer Windenergieanlage angebracht sind, ergibt sich eine veränderte Richtcharakteristik. Die in diesem Vorhaben betrachteten Gründungstypen sind der Tripod an den Anlagen der Fa. AREVA-Wind sowie die aufgelöste Jacket-Konstruktion der Fa. REPower. Wie bereits beschrieben wurde, sind im Laufe des Vorhabens zwei prototypische Transpondersysteme an den südlichen Anlagen AV10 und AV12 im Testfeld *alpha ventus* installiert worden. Sowohl AV10 als auch AV12 sind auf einer Tripod-Konstruktion gegründet. Die Ermittlung der Richtcharakteristik des an einer Jacket-Konstruktion installierten Wandlers ist deshalb nur qualitativ im Rahmen der Simulation möglich.



Abb. 23: Vergleich der Richtcharateristiken bei freier Abstrahlung und bei Abstrahlung der an den unterschiedlichen Gründungskonstruktionen installierten Wandler

Zur Erklärung sei an dieser Stelle daran erinnert, dass der Transponder am Tripod im Bereich des oberen Knotenpunktes zwischen den Beinen des Tripod angebracht ist. Durch die konkave Geometrie an dieser Stelle ist der Schallwandler zwar besser vor Strömungs- und Wellenlasten geschützt, jedoch wird dadurch die Richtcharakteristik stärker eingeschränkt als an der Jacket-Konstruktion. Ferner wird erneut deutlich, dass auch an der Jacket-Konstruktion die für den Windpark *alpha ventus* bestehende Forderung nach einer Winkelabdeckung von 180° bei der Installation eines einzelnen Schallwandlers nicht erreicht wird.

# 3.5 Simulationsergebnisse zu den Übertragungsverlusten

## von Moritz Fricke (ISD)

Die Simulationen der Schallausbreitung wurden bis in eine Entfernung von 7200 m durchgeführt. Diese Entfernung entspricht etwa 4 NM und damit der doppelten in (Nissen 2004) genannten kritischen Reichweite. Um eine Vergleichbarkeit mit den in (Nissen 2004) dargestellten Simulationsergebnissen herzustellen, wurden die Simulationen zunächst für die dort angenommenen Schallgeschwindigkeitsprofile und Wetterbedingungen durchgeführt, die bereits in Kapitel 3.2.1.3 vorgestellt wurden. Die im Folgenden beschriebenen Simulationsergebnisse bilden die Grundlage für die Auswahl der Messpunkte in *alpha ventus* und für vergleichende Simulationen anhand der während der Messungen aufgenommenen Umgebungsbedingungen. Abb. 24 zeigt die Simulationsergebnisse für die Übertragungsverluste in Hauptabstrahlrichtung für die vier verschiedenen angenommen Schallgeschwindigkeitsprofile unter Annahme eine Windgeschwindigkeit von 15 m/s. Die jeweils gestrichelt dargestellte Kurve zeigt zum Vergleich die Simulationsergebnisse aus (Nissen 2004). Es ist zu erkennen, dass im gesamten betrachteten Entfernungsbereich eine hohe Übereinstimmung vorliegt. Ferner wird schon hier die hohe Abhängigkeit der Übertragungsverluste vom angenommenen Schallgeschwindigkeitsprofil deutlich. Während bei den Profilen "April" und "Juli" die Übertragungsverluste auch in einer Entfernung von 4 NM noch weit unter 100 dB liegen, ergeben sich für die Profile "Januar" und "Oktober" empfindlich eingeschränkte Reichweiten, die aus dem Zusammenwirken der hohen Dämpfung in Oberflächennähe infolge Blaseneintrag und des aufwärtsbrechenden Schallgeschwindigkeitsprofils resultieren. Die größte Einschränkung der Reichweite liegt für das "Oktober"-Profil vor.



Abb. 24: Vergleich der simulierten Übertragungsverluste mit Ergebnissen aus (Nissen 2004) für unterschiedliche Schallgeschwindigkeitsprofile.

Um diesen Zusammenhang weiter zu verdeutlichen, sind in Abb. 25 die Simulationsergebnisse dargestellt, die sich unter Annahme des Schallgeschwindigkeitsprofils "Oktober" für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten ergeben.



Abb. 25: Vergleich der simulierten Übertragungsverluste mit den Ergebnissen aus (Nissen 2004) für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten

Anhand der Kurven für Windgeschwindigkeiten von 10 m/s und 15 m/s wird deutlich, dass gerade im Bereich höherer Windgeschwindigkeiten die Abhängigkeit der Übertragungsverluste von der Windgeschwindigkeit zunimmt. Es ist festzuhalten, dass für die Übertragungsverluste sowohl hinsichtlich des

Schallgeschwindigkeitsprofils als auch hinsichtlich der Windgeschwindigkeit eine hohe Sensitivität vorliegt.

Abb. 26 sind die Ergebnisse der Berechnungen für das Schallgeschwindigkeitsprofil "Oktober" und für die Windgeschwindigkeiten 5 m/s und 15 m/s als vertikaler Schnitt in Hauptrichtung sowie als horizontaler Schnitt in halber Wassertiefe zu entnehmen. Zusätzlich sind jeweils das Schallgeschwindigkeitsprofil und das Dämpfungsprofil dargestellt. Mit dem blauen Pfeil wird die Hauptabstrahlrichtung angezeigt.



Abb. 26: Horizontale und vertikale Schnitte zur Darstellung der Übertragungsverluste.

Oben: Oktober, v\_wind=2m/s; Unten: Oktober, v\_wind=15m/s

## 3.6 Diskussion der Simulationsergebnisse

#### von Moritz Fricke (ISD)

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus (Nissen 2004). Es wird deutlich, dass eine hohe Abhängigkeit der Übertragungsverluste und damit der Reichweite von den Umgebungsbedingungen Schallgeschwindigkeitsprofil und Windgeschwindigkeit gegeben ist. Darüber hinaus zeigen die Simulations- und Messergebnisse zur Richtcharakteristik der Quelle, dass die für den Windpark *alpha ventus* geforderte Winkelabdeckung von 180° weder bei freier Schallabstrahlung noch in der Einbausituation an der Gründungskonstruktion erreicht wird. Auf Grundlage der in (Nissen 2004) getroffenen Annahme eines Störgeräuschpegels von 90 dBre1µPa im Frequenzbereich 7-8 kHz und einem zur Detektion notwendigen Signalpegel von 10dB über dem Störgeräuschpegel in einer Entfernung von 2 NM wird die Forderung nach einem Quellpegel von 200 dBre1µPa in 1 m durch die erzielten Simulationsergebnisse unterstrichen.

# 4 Hydroakustische Messungen (FKZ 0325104A)

# 4.1 Einführung

## von Moritz Fricke (ISD)

Zur Vermessung der Übertragungsverluste und zur Durchführung von Aktivierungstests wurden im Rahmen des Vorhabens zwei Messkampagnen im Testfeld *alpha ventus* durchgeführt. Ausgehend von den Simulationsergebnissen hinsichtlich der Übertragungsverluste konnte bereits im Vorfeld der Messkampagnen der Schwerpunkt auf die Vermessung des Transponders an der Anlage AV12 gesetzt werden, da dieser mit einem Schallwandler vom Typ 2, also mit dem höheren Quellpegel, ausgestattet ist.

Während der ersten Messkampagne (11.-13.10.2010) wurden die richtungs- und entfernungsabhängigen Übertragungsverluste des an der Anlage AV12 installierten Transponders unter guten Wetterbedingungen (Windstärke 3-4, Seegang 2) vermessen. Ferner wurde während der ersten Messkampagne eine Testreihe hinsichtlich der Aktivierbarkeit und Störfestigkeit gegen Fehlaktivierung des Transponders an AV12 durchgeführt. Im Zuge der zweiten Messkampagne (23.-24.02.2011) wurde die Vermessung der Übertragungsverluste bezüglich des Transponders an AV12 unter ungünstigeren Wetterbedingungen (Windstärke 5-6, Seegang 4) wiederholt. Zusätzlich wurde in vergleichbarer Weise die Vermessung des Transponders an AV10 unter schlechten Wetterbedingungen durchgeführt.

# 4.2 Messaufbau und Methodik

## 4.2.1 Eingesetzte Messtechnik

## von Joachim Gabriel (DEWI)

Die nachfolgend dokumentierten Auswertungen beziehen sich auf die Messung des DEWI in 15 m Tiefe. Die für diese Messung eingesetzte Messtechnik wird in der folgenden Tabelle aufgelistet.

| Audiorecorder:       | Fostex FR-2        |
|----------------------|--------------------|
| Hydrofon:            | Bruel & Kjaer 8106 |
| Hydrofon:            | Bruel & Kjaer 8106 |
| Hydrofonkalibrator:  | Bruel & Kjaer 4229 |
| Hydrofonversorgung:  | Bruel & Kjaer 2804 |
| Positionsbestimmung: | GPS                |

Tab. 7: Eingesetzte Messgeräte

Bei dem eingesetzten Hydrofon Bruel & Kjaer 8106 handelt es sich um einen Typ mit eingebautem Verstärker. Die Empfindlichkeit wird vom Hersteller mit -174 dB re  $1V/\mu$ Pa angegeben. Die Versorgung des eingebauten Verstärkers erfolgte mit der Hydrofonversorgung Bruel & Kjaer 2804.



Abb. 27: Eingesetztes Hydrofon

Das Hydrofonsignal wurde für die Laborauswertung mit einem Audiorecorder Fostex FR-2 aufgezeichnet. Die Abtastrate der Aufzeichnung betrug 48 kHz bei einer Auflösung von 24 Bit. Für jeden Messaufbau wurde zusätzlich das Signal des Hydrofonkalibrators Bruel & Kjaer 4229 (250 Hz) registriert.

# 4.2.2 Lage der Messpunkte

## von Moritz Fricke (ISD)

Die in Kapitel 3.4 vorgestellten Simulationsergebnisse zeigen eine deutliche Richtungs- und Entfernungsabhängigkeit der Übertragungsverluste. Als kritische Reichweite wird in (Nissen 2004) eine Entfernung von 2 NM angegeben, in der die Detektierbarkeit des Signals gegeben sein muss. Die Messpunkte wurden daher in 450 m (ca. 0,25 NM), 900 m (ca. 0,5 NM), 1800 m (ca. 1 NM) und 3600 m (ca. 2 NM) vorgesehen. Um eine Validierung der Simulationen auch darüber hinaus zu ermöglichen, wurden die äußersten Messpunkte in einer Entfernung von 7200 m, also ca. 4 NM, gewählt. Die qualitative Anordnung der Messpunkte ist Abb. 28 zu entnehmen. Ferner sind darin die Hauptabstrahlrichtungen der Wandler zu erkennen.

Im Bereich *alpha ventus* liegt keine ausgeprägte Bathymetrie vor. Der Meeresboden weist ein leichtes Gefälle in nördlicher Richtung auf, das jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die Schallausbreitung hat. Aufgrund dieser örtlichen Gegebenheit und der Symmetrie der Schallquelle wurden die Messpunkte auf Halbkreisen mit den oben genannten Radien angeordnet, jeweils in Azimutwinkeln von 0°, 45°, 90°, 135° und 180° zur Hauptabstrahlrichtung der Wandler.



Abb. 28: Lage der Messpunkte im Testfeld alpha ventus

Die in Abb. 28 dargestellten Messpositionen sind als Zielpositionen zu verstehen, die vor den Messkampagnen festgelegt wurden. Es ist leicht nachvollziehbar, dass diese in der Praxis nur mit endlicher Genauigkeit erreicht werden können. In Abb. 61 im Anhang ist daher der Unterschied zwischen den Zielpositionen und den tatsächlichen Messpositionen während der beiden Messkampagnen dargestellt. Ferner gibt es Messpositionen, die in unmittelbarer Nähe zu Windenergieanlagen liegen und daher aus Sicherheitsgründen ausgelassen wurden. Die tatsächlichen Messpositionen wurden mit einem GPS-Logger ermittelt, der in Abständen von 30 s die aktuelle Position aufzeichnet. Da das Schiff während der Messung an einer Position nicht verankert wurde und aufgrund von Wind und Strömung vertrieben wurde, hat es sich im Rahmen der Messdatenauswertung als zweckmäßig erwiesen, als tatsächliche Messposition die nach der Hälfte der Messdauer durch den GPS-Logger aufgezeichnete Position anzunehmen und daraus die relative Entfernung und Richtung zu errechnen.

## 4.2.3 Umgebungsbedingungen

#### von Moritz Fricke (ISD)

Neben der tatsächlichen Messposition sind die während der Messungen vorherrschenden Umgebungsbedingungen von großer Bedeutung für die Bewertung der Messergebnisse und die Validierung der Simulationen. Abb. 29 sind die während der beiden Messkampagnen an der Forschungs-Plattform FINO1 aufgezeichneten Wellenhöhen und Windgeschwindigkeiten zu entnehmen. Bei den Wellenhöhen handelt es sich um die signifikante Wellenhöhe in Mittelungsintervallen von 30 min. Die Windgeschwindigkeiten sind dargestellt als mittlere Windgeschwindigkeiten in Intervallen von 10 min. An dieser Stelle als angemerkt, dass die Messdaten der ersten Messkampagne zum überwiegenden Teil am 12.10.10 bis zum frühen Nachmittag gewonnen wurden. Sowohl für den 12.10.10 als auch für den Vortag lagen überwiegend niedrige signifikante Wellenhöhen (<0,7m) und geringe mittlere Windgeschwindigkeiten (3-8 m/s) vor. Für die zweite Messkampagne ergeben sich hingegen eine mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 10 m/s und signifikante Wellenhöhen zwischen 1,2 und 1,4 m.



Abb. 29: Windgeschwindigkeiten und signifikante Wellenhöhen während der Messkampagnen (Quelle: FINO1-Datenbank/BMU)

Während der beiden Messkampagnen wurden mit einer CTD-Sonde stichprobenartig Schallgeschwindigkeitsprofile an einzelnen Messpositionen aufgenommen. Wie Abb. 30 (links) zeigt, sind die gemessen Schallgeschwindigkeitsprofile während der ersten Messkampagne dem Profil für den Monat Oktober aus (Nissen 2004) sehr ähnlich. Vergleicht man hingegen die gemessenen Schallgeschwindigkeitsprofile der zweiten Messkampagne mit dem Schallgeschwindigkeitsprofil für den Monat Januar, so ergibt sich zwar ein ähnlicher Verlauf des Schallgeschwindigkeitsgradienten über der Tiefe, jedoch unterscheiden sich die Profile um etwa 10 m/s. Abb. 30 (rechts) macht überdies die große zeitliche Varianz des Schallgeschwindigkeitsprofils deutlich. Wie in Kapitel 3 erläutert wurde, ist das Schallgeschwindigkeitsprofil eine sehr sensitive Größe für die Durchführung der Simulationen, die sich für einen Vergleich zwischen Simulation und Messung nicht vorhersagen lässt, sondern stets parallel zur hydroakustischen Messung aufgenommen und a-posteriori in die Simulation übernommen werden muss.



Abb. 30: Während der beiden Messkampagnen gemessene Schallgeschwindigkeitsprofile

#### 4.2.4 Methodik der Datenauswertung

#### von Moritz Fricke (ISD)

Aufgrund des Musters der vom Sonartransponder ausgesendeten Signalsequenz ist eine spezielle Datenauswertung erforderlich, die im Folgenden erläutert wird. Da die Messung an den jeweiligen Messpunkten nicht zeitgleich mit der Aktivierung der Sonartransponder gestartet wurde, sondern mit einem gewissen Vorlauf, wurden aus den Rohdaten zunächst nur die relevanten Zeitabschnitte extrahiert. Zur visuellen Kontrolle der so gewonnenen einheitlichen Zeitschriebe wurden die Daten mit einem Bandpassfilter dritter Ordnung und den Grenzfrequenzen 6900 bzw. 8100 Hz gefiltert, um maskierende Umgebungs- und Schiffsgeräusche zu minimieren. In einem weiteren Schritt wurden die Daten einer SFFT (Short-Time-Fast-Fourier-Transformation) unterzogen. Dabei wurde der Zeitschrieb in Abschnitte von 1 s unterteilt. Mit jedem der so entstandenen Blöcke wurde wiederum eine FFT (Fast-Fourier-Transformation) mit einer Frequenzauflösung von 1 Hz durchgeführt. Auf diese Weise lässt sich das Leistungsdichtespektrum (PSD) über der Zeit in Form eines Spektrogramms nach Abb. 31 (oben) darstellen.

An einem Spektrogramm lässt sich anschaulich die zeitliche und spektrale Struktur des Messsignals ablesen. Wie Abb. 31 (oben) zu entnehmen ist, sendeten die Sonartransponder während der Messungen mit einem jeweils monofrequenten Signal mit den Frequenzen 7500 bzw. 7800 Hz. Aus der Kenntnis der Sendefrequenzen des Nutzsignals lässt sich der Signalpegel für jeden zeitlichen Block durch Bestimmung des Maximums des Leistungsdichtespektrums im Frequenzbereich [7400 Hz .. 7900 Hz] ermitteln und über der Zeit darstellen (vgl. Abb. 31 (Mitte, rote Linie)). Auf gleiche Weise wurde der Störpegel im Frequenzbereich [7000 Hz .. 7300 Hz], also außerhalb des Nutzsignal-Bereiches, bestimmt. Der Störpegel ist in Abb. 31 als blaue Linie dargestellt. Um den Störabstand (SNR) in Abhängigkeit der Zeit zu bestimmen, wurde die Differenz zwischen Signal- und Störpegel gebildet, die in Abb. 31 (unten) als schwarze Linie abgebildet ist.

Zur Angabe von Einzahlwerten für Signalpegel, Störpegel und Störabstand wurde jeweils das energetische Mittel aus allen Zeitblöcken gebildet, in denen der Sonartransponder sendete. Dabei ist zu beachten, dass die Zeit des Soft-Starts nicht in die Mittelung einbezogen wurde, da der Nenn-Quellpegel erst nach Ende des Soft-Starts erreicht wird.



Abb. 31: Spektrogramme und extrahierte Pegelverläufe; links: Entfernung: 3793m, Winkel zur Hauptabstrahlrichtung: 1°, Messkampagne 10/2010; rechts: Entfernung: 3796m, Winkel zur Hauptabstrahlrichtung: 2°, Messkampagne 02/2011

# 4.3 Richtungsabhängigkeit des Schallfeldes

#### von Moritz Fricke (ISD)

Wie bereits anhand der Ergebnisse der akustischen Simulationen erläutert wurde, weist der an der Gründungsstruktur angebrachte Schallwandler eine ausgeprägte Richtcharakteristik auf. Daraus ergibt sich eine signifikante horizontale Richtungsabhängigkeit des Schallfeldes, die zur Bewertung der Übertragungsverluste Berücksichtigung finden muss.

Abb. 32 zeigt die Abhängigkeit des Signalpegels vom Azimutwinkel relativ zur Hauptachse, dargestellt als Pegelunterschied bezogen auf den in der Hauptsichtung gemessenen Signalpegel. Zu erkennen ist darin, dass der Signalpegel unter einem Azimutwinkel von 90° weitestgehend unabhängig von der Entfernung etwa 15-20 dB unter dem in Hauptrichtung ermittelten Signalpegel liegt.



Abb. 32: Winkelabhängige Pegeldifferenz relativ zur Hauptabstrahlrichtung

An dieser Stelle sei angemerkt, dass keine Umrechnung der gemessenen Signalpegel von der tatsächlichen Messentfernung auf die vorgesehen Entfernungen (900 m, 1800 m etc.) vorgenommen wurde. Durch die Positionierungsungenauigkeit während der Messungen ergeben sich nur geringe Pegelfehler, die für die zu treffenden Aussagen unerheblich sind. Ferner stellte sich im Falle einer Umrechnung die Frage nach dem Berechnungsansatz, da sich für die beiden Messkampagnen aufgrund der unterschiedlichen Wetterverhältnisse unterschiedliche Übertragungsverluste und damit unterschiedliche Pegelgradienten ergeben, wie im folgenden Unterkapitel erläutert wird.

#### 4.4 Übertragungsverluste

#### von Moritz Fricke (ISD)

Die nach der Beschreibung in Kap. 4.2.4 ermittelten Einzahlwerte für den Signalpegel an einzelnen Messpositionen lassen unter der Kenntnis des Quellpegels eine Berechnung der Übertragungsverluste in Abhängigkeit der Entfernung zu. Für den an der Anlage AV12 installierten Wandler wurde durch die Messungen der WTD71 ein Quellpegel von 199 dBre1µPa in 1 m ermittelt (WTD71 2010). Als Differenz zwischen Quellpegel und den während der beiden Messkampagnen gemessenen Signalpegeln ergeben sich die Abb. 33 dargestellten Übertragungsverluste. Die Ordinate zeigt darin die zunehmenden Übertragungsverluste in negativer y-Richtung, um einen anschaulichen Vergleich zum beschriebenen Sachverhalt, nämlich einer Abnahme des Pegels mit der Entfernung, zu erleichtern.

Zunächst ist erkennbar, dass im niedrigen bis mittleren Entfernungsbereich (<2000 m) kein wesentlicher Einfluss der unterschiedlichen Wetterbedingungen vorliegt. In diesem Bereich werden die Übertragungsverluste maßgeblich durch die geometrische Pegelabnahme bestimmt. In Entfernungen von über 2000 m werden die durch die während der zweiten Messkampagne vorherrschenden ungünstigen Wetterverhältnisse bedingten erhöhten Übertragungsverluste deutlich, die auf den Einfluss der Absorption in der oberflächennahen Wasserschicht zurückzuführen sind.



Abb. 33: In Hauptabstrahlrichtung gemessene Übertragungsverluste für unterschiedliche Wetterbedingungen

Zum Vergleich sind in Abb. 33 die Übertragungsverluste für die Berechnung mit der Vorschrift  $TL = k \cdot \log_{10} (R/R_0)$  mit k = 15 und k = 20 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Übertragungsverluste, die während der ersten Messkampagne unter günstigen Wetterbedingungen ermittelt wurden, im gesamten betrachteten Entfernungsbereich zwischen den Vergleichsverläufen für k = 15 und k = 20 liegen. Auf die Übertragungsverluste unter schlechten Wetterbedingungen trifft dies aufgrund der erhöhten Dämpfung nicht zu.

Vergleicht man die während der zweiten Messkampagne gemessenen entfernungsabhängigen Signalpegel für die Messungen an den Anlagen AV12 und AV10, so ergeben sich die in Abb. 34 dargestellten Verläufe. Es ist zu erkennen, dass die Differenz der beiden Kurven etwa 23 dB beträgt und von der Entfernung nahezu unabhängig ist. Diese Differenz ist zum einen auf die Differenz der Quellpegel von 12 dB zurückzuführen. Zum anderen ist davon auszugehen, dass die Wandler einen unterschiedlichen starken Bewuchs aufweisen. Starker Bewuchs kann den Quellpegel der Wandler verringern. Der Wandler an der Anlage AV10 ist bereits an Land an der Gründungskonstruktion installiert worden und daher etwa 1,5 Jahre länger Seewasser ausgesetzt gewesen.



Abb. 34: Vergleich der gemessenen entfernungsabhängigen Signalpegel für die Transponder an AV10 und AV12. Die Messungen erfolgen jeweils in Hauptabstrahlrichtung

Hinsichtlich des Wandlers an der AV12 kann davon ausgegangen werden, dass kein fortgeschrittener Bewuchs vorliegt, da dieser erst im Juni 2010 installiert wurde. Der Zusammenhang zeigt jedoch, dass eine regelmäßige Überprüfung des Bewuchses bzw. seiner Auswirkungen auf die akustischen Eigenschaften notwendig ist.

# 4.5 Aktivierungstest

## von Rainer Matuschek und Klaus Betke (ITAP)

Für die Praxistauglichkeit des Sonartransponders ist nicht nur entscheidend, dass die ausgesendeten Signale den benötigten Spezifikationen entsprechen, sondern auch, dass die Aktivierung des Transponders durch akustische Signale zuverlässig funktioniert und keine Fehlauslösungen auftreten: Aktiviert werden soll der Transponder durch einen mindestens 1 s dauernden Sinuston im Frequenzbereich 8080 Hz bis 8150 Hz Zum Auslösen soll ein Signal-Rauschabstand in diesem Band von nicht mehr als 10 dB erforderlich sein (Nissen 2004). Gefordert wird also:

- Ausreichende Empfindlichkeit im Aktivierungs-Frequenzbereich
- Keine Aktivierung durch zu kurze Signale
- Keine Auslösung durch Signale außerhalb des Aktivierungs-Frequenzbereichs (z.B. durch die von einem benachbarten Sonartransponder ausgesendeten Töne)
- Keine Auslösung durch breitbandige Signale (Maschinengeräusche, Niederschlag)

Im Detail lassen sich diese Parameter nur unter Laborbedingungen messen (vgl. Abschnitt 2.5). Ergänzend wurden dazu einige Messungen vor Ort am Transponder an AV12 vorgenommen.

# 4.5.1 Methode

Abb. 35 zeigt schematisch den Messaufbau, die benutzten Geräte sind in Tab. 8 aufgeführt. Die Sendesignale wurden mit einem sog. arbiträren Funktionsgenerator erzeugt (HP 33120A), der zur Erzeugung von Sinusbursts unterschiedlicher Länge programmiert war. Ergänzend waren einige Rauschsignale zuvor als Audiodateien erstellt und auf einen Recorder (PMD 620) abgespeichert worden. Über einen Leistungsverstärker (B&K 2713) wurde das jeweilige Testsignal dem Sendewandler (ITC-1001) in 10 m Tiefe zugeführt. Der Wandler hat eine Rundum-Abstrahlcharakteristik. Mit Hilfe eines Oszilloskops am Verstärkerausgang wurde der Sendepegel protokolliert. Ebenfalls 10 m unter der Wasseroberfläche befand sich ein Hydrofon, mit dem die Funktion des Schallsenders überwacht und außerdem beobachtet wurde, ob der Transponder durch das ausgesendete Signal aktiviert werden konnte oder nicht.

Die Messungen fanden am 13. Oktober 2010 bei ruhiger See an Bord der MS Emswind statt. Es wurde dazu eine Position einige 100 m östlich von AV12 angefahren. Anschließend trieb das Schiff bei abgeschaltetem Antrieb durch die zu dieser Zeit herrschende Strömung in östlicher Richtung von AV12 weg. Während dieses Zeitabschnitts wurden die Aktivierungsversuche vorgenommen, bis eine Entfernung von AV12 von etwa 1.7 km erreicht war. Um möglichst viele Tests machen zu können, war die Sendedauer des Transponders zuvor von Mitarbeitern der THALES Instruments vom Nominalwert 5 Minuten auf etwa 30 s verringert worden. Diese Signaldauer reichte völlig aus, um an Bord der Emswind eine Aktivierung des Transponders zu erkennen.

Insgesamt wurde eine Anzahl von Versuchen mit folgenden Signalen vorgenommen, wobei der Sendepegel jeweils variiert wurde (ausführliche Auflistung im Abschnitt "Ergebnisse"):

- Mittenfrequenz 8115 Hz, Sendedauer 2 s
- Bereich um die untere Eckfrequenz 8080 Hz, Sendedauer 2 s
- Bereich um die obere Eckfrequenz 8150 Hz, Sendedauer 2 s
- Mittenfrequenz 8115 Hz, Sendedauer 0.6 s bis 2 s
- Rauschen im Band 7900 Hz bis 8400 Hz, Sendedauer 5 s
- Rauschen im Band 5600 Hz bis 11300 Hz (Oktavrauschen 8 kHz), Sendedauer 5 s



Abb. 35: Schematische Darstellung der Testmethode vor Ort. Der Sendewandler ("Transducer") und das Hydrofon wurden an gegenüberliegenden Seiten der MS Emswind ausgebracht und befanden sich rund 10 m unter der Wasseroberfläche.

| Gerät   | Hersteller                           |
|---|--------------------------------------|
| Funktionsgenerator HP 33120A                            | Hewlett-Packard                      |
| Audio-Recorder PMD 620                                  | Denon-Marantz                        |
| Leistungsverstärker 2713                                | Brüel & Kjær                         |
| Oszilloskop TDS 220                                     | Tektronix                            |
| Schallwandler ITC-1001                                  | International Transducer Corporation |
| Hydrofon TC 4033  | Reson                                |
| Ladungsverstärker 3 mV/pC (Vorverstärker für Hydrofon)  | itap                                 |
| Kalibrierquelle (Pistonphone) 42AP mit Hydrofon-Kuppler | G.R.A.S                              |
| Audio-Recorder HD-P2                                    | Tascam                               |
| GPS-Geräte GPSmap 76cx und Oregon 450                   | Garmin                               |

| Tah  | 8. | Fingesetzte | Ceräte an | Rord | der | Fmswind    |
|------|----|-------------|-----------|------|-----|------------|
| ran. | ο. | Emgesetzte  | Gerate an | Doru | uer | EIIISWIIIU |



Abb. 36: Sendewandler mit Ballastgewicht



Abb. 37: Geräte an Bord der Emswind

#### 4.5.2 Bestimmung des Sende- und Empfangspegels

Da keine Möglichkeit bestand, das am Transponder an AV12 eintreffende Aktivierungssignal direkt zu messen, wurde dessen Pegel näherungsweise aus dem Sendepegel bestimmt. Dazu werden Zahlenwerte benötigt, wie stark das Signal auf dem Weg vom Sender zum Empfänger abnimmt. (Nissen 2004) hat die Ausbreitungsdämpfung der Transpondersignale bei 8 kHz mit einem Raytracing-Modell berechnet. In Abb. 38 sind einige der Ergebnisse dargestellt, sie gelten für eine Wassertiefe von 30 m und Sender und Empfänger in halber Wassertiefe. Außer bei starkem Wind und Seegang und dadurch höherer Dämpfung durch Eintrag von Luftblasen ins Wasser stimmen die Werte gut mit denen überein, welche Formel nach Thiele (Thiele und Schellstede 1980) liefert:

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

Hierin ist  $F = 10 \log(f / kHz)$  und R die Entfernung in km. (Thiele und Schellstede 1980) haben die Schallausbreitung in der Nordsee in verschiedenen Gebieten und bei unterschiedlichen Wetterbedingungen gemessen. Obige Gleichung basiert auf Messungen im Bereich 4° bis 7° Ost und 54° bis 56° Nord und gilt für "glatte See". Die Ausbreitungsdämpfung zwischen der MS Emswind und AV12 wurde mit dieser Formel bestimmt. (Hinweis: Die "Feinstruktur" der Übertragungsfunktion wird durch diese einfache Rechnung nicht berücksichtigt, siehe Abschnitt Diskussion der Ergebnisse4.6.3)

Der Sendepegel, also der Schallpegel in einer fiktiven Entfernung von 1 m vom punktförmig gedachten Sender, wurde aus der gemessenen Spannung am Sendewandler und den Herstellerdaten zur Sendeempfindlichkeit ermittelt. Es wurde von einem Wert von 132 dB re 1  $\mu$ Pa m/V ausgegangen (vgl. Abb. 39). Es wurden Spannungen von etwa 1 V<sub>RMS</sub> bis 100 V<sub>RMS</sub> angelegt, was somit Sendepegeln von 132 dB bis 172 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m entspricht.



Abb. 38: Mit einem Raytracing-Programm für verschiedene Bedingungen berechnete Ausbreitungsdämpfung (Nissen 2004) im Vergleich zur Ausbreitungsdämpfung nach Thiele (Thiele und Schellstede 1980)



Abb. 39: Sendeempfindlichkeit des benutzten Wandlers ITC-1001. Bei 8 kHz beträgt sie 132 dB re 1µPa m/V.

# 4.5.3 Ergebnisse

Die Aktivierungsversuche sind in den nachstehenden Tabellen aufgelistet. Zunächst wurden Versuche mit einem Ton in der Mitte des Aktivierungsfrequenzbandes vorgenommen (vgl. Tab. 9), dann an den Bandgrenzen (vgl. Tab. 10). Anschließend wurde als Sendesignal ein Ton in Bandmitte benutzt, aber mit variabler Dauer bis unter das spezifizierte Minimum von 1 s (vgl. Tab. 11). In Tab. 12 schließlich sind einige Tests mit Bandpassrauschen von 500 Hz Breite und Oktavbreite aufgeführt.

| Tab. 9: Aktivierungsversuche auf der | · Bandmittenfrequenz |
|--------------------------------------|----------------------|
|--------------------------------------|----------------------|

| Sendesignal                           | Versuch<br>Nr. | Entfernung<br>von AV12,<br>m | Spannung<br>am Sende-<br>wandler, V <sub>RMS</sub> | Sendepegel,<br>dB re 1 µPa<br>@ 1 m | Ungefährer<br>Pegel an<br>AV12,<br>dB re 1 µPa | Transponder<br>aktiviert? |
|---------------------------------------|----------------|------------------------------|--|-------------------------------------|--|---------------------------|
| Ton 8115 Hz (Bandmitte),<br>Dauer 2 s | 1              | 855                          | 33   | 162                                 | 109  | ja                        |
|                                       | 2              | 842                          | 10.6   | 153                                 | 100  | ja                        |
|                                       | 3              | 841                          | 3.2  | 142                                 | 89   | ja                        |
|                                       | 4              | 842                          | 3.2  | 142                                 | 90   | ja                        |
|                                       | 5              | 844                          | 0.95   | 132                                 | 79   | ja                        |
|                                       | 6              | 846                          | 0.95   | 132                                 | 79   | nein                      |
|                                       | 7              | 850                          | 0.95   | 132                                 | 79   | nein                      |
|                                       | 8              | 854                          | 0.95   | 132                                 | 79   | nein                      |
|                                       | 9              | 859                          | 3.2  | 142                                 | 89   | ja                        |

| Sendesignal              | Versuch<br>Nr. | Entfernung<br>von AV12,<br>m | Spannung<br>am Sende-<br>wandler, V <sub>RMS</sub> | Sendepegel,<br>dB re 1 µPa<br>@ 1 m | Ungefährer<br>Pegel an<br>AV12,<br>dB re 1 µPa | Transponder<br>aktiviert? |
|--------------------------|----------------|------------------------------|--|-------------------------------------|--|---------------------------|
| Ton 8080 Hz (untere      | 10             | 865                          | 3.2  | 142                                 | 89   | nein                      |
| Bandgrenze), Dauer 2 s   | 11             | 872                          | 3.2  | 142                                 | 89   | ja                        |
|                          | 12             | 879                          | 3.2  | 142                                 | 89   | ja                        |
|                          | 13             | 888                          | 3.2  | 142                                 | 89   | ja                        |
| Ton 8150 Hz (obere Band- | 14             | 897                          | 3.2  | 142                                 | 89   | nein                      |
| grenze), Dauer 2 s       | 15             | 907                          | 3.2  | 142                                 | 89   | nein                      |
|                          | 16             | 918                          | 3.2  | 142                                 | 88   | nein                      |
|                          | 17             | 930                          | 3.2  | 142                                 | 88   | nein                      |
|                          | 18             | 942                          | 3.2  | 142                                 | 88   | nein                      |
|                          | 19             | 956                          | 10.1   | 152                                 | 98   | nein                      |
|                          | 20             | 970                          | 10.1   | 152                                 | 98   | nein                      |
|                          | 21             | 985                          | 32   | 162                                 | 108  | nein                      |
|                          | 22             | 1001                         | 32   | 162                                 | 108  | nein                      |
|                          | 23             | 1018                         | 32   | 162                                 | 108  | nein                      |
|                          | 24             | 1036                         | 32   | 162                                 | 107  | nein                      |
|                          | 25             | 1055                         | 32   | 162                                 | 107  | nein                      |
|                          | 26             | 1074                         | 32   | 162                                 | 107  | nein                      |
|                          | 27             | 1094                         | 99   | 172                                 | 117  | nein                      |
|                          | 28             | 1115                         | 99   | 172                                 | 117  | nein                      |
| Ton 8140 Hz (obere Band- | 29             | 1137                         | 32   | 162                                 | 107  | ja                        |
| grenze), Dauer 2 s       | 30             | 1160                         | 32   | 162                                 | 106  | ja                        |
|                          | 31             | 1184                         | 32   | 162                                 | 106  | ja                        |
|                          | 32             | 1208                         | 32   | 162                                 | 106  | ja                        |
|                          | 33             | 1234                         | 32   | 162                                 | 106  | ja                        |
|                          | 34             | 1260                         | 32   | 162                                 | 106  | ja                        |
|                          | 35             | 1287                         | 10.6   | 153                                 | 96   | ja                        |
|                          | 36             | 1315                         | 10.6   | 153                                 | 96   | ja                        |
|                          | 37             | 1344                         | 10.6   | 153                                 | 96   | ja                        |
|                          | 38             | 1373                         | 10.6   | 153                                 | 95   | ja                        |
|                          | 39             | 1404                         | 10.6   | 153                                 | 95   | ja                        |

Tab. 10: Aktivierungsversuche an den Bandgrenzen
| Sendesignal              | Versuch<br>Nr. | Entfernung<br>von AV12,<br>m | Spannung<br>am Sende-<br>wandler, V <sub>RMS</sub> | Sendepegel,<br>dB re 1 µPa<br>@ 1 m | Ungefährer<br>Pegel an<br>AV12,<br>dB re 1 µPa | Transponder<br>aktiviert? |
|--------------------------|----------------|------------------------------|--|-------------------------------------|--|---------------------------|
| Ton 8115 Hz, Dauer 2.0 s | 40             | 1435                         | 10.2   | 152                                 | 95   | ja                        |
| Ton 8115 Hz, Dauer 0.6 s | 41             | 1467                         | 10.2   | 152                                 | 94   | nein                      |
|                          | 42             | 1500                         | 10.2   | 152                                 | 94   | nein                      |
| Ton 8115 Hz, Dauer 1.0 s | 43             | 1534                         | 10.2   | 152                                 | 94   | nein                      |
| Ton 8115 Hz, Dauer 1.1 s | 44             | 1569                         | 10.2   | 152                                 | 94   | nein                      |
|                          | 45             | 1604                         | 10.2   | 152                                 | 94   | ja                        |
|                          | 46             | 1641                         | 10.1   | 152                                 | 93   | ja                        |
|                          | 47             | 1678                         | 10.1   | 152                                 | 93   | ja                        |
| Ton 8115 Hz, Dauer 2.0 s | 48             | 1716                         | 32   | 162                                 | 103  | ja                        |

Tab. 11: Aktivierungsversuche mit verkürzter Tondauer

Tab. 12: Aktivierungsversuche mit Rauschsignalen. Die Zahlen in Klammern geben den Pegel des Anteils des Rauschsignals an, der innerhalb des Aktivierungsfrequenzbands 8080 Hz bis 8150 Hz liegt.

| Sendesignal                                     | Versuch<br>Nr. | Entfernung<br>von AV12,<br>m | Spannung<br>am Sende-<br>wandler, V <sub>RMS</sub> | Sendepegel,<br>dB re 1 µPa<br>@ 1 m | Ungefährer<br>Pegel an<br>AV12,<br>dB re 1 µPa | Transponder<br>aktiviert? |
|---|----------------|------------------------------|--|-------------------------------------|--|---------------------------|
| Rauschen 7900 Hz bis<br>8400 Hz, Dauer 5 s      | 49             | 761                          | 20   | 158<br>(149)                        | 106<br>(97)                                    | nein                      |
|   | 50             | 797                          | 60   | 168<br>(158)                        | 115<br>(106)                                   | nein                      |
|   | 51             | 834                          | 60   | 168<br>(158)                        | 115<br>(106)                                   | nein                      |
|   | 52             | 870                          | 60   | 168<br>(158)                        | 115<br>(105)                                   | nein                      |
| Rauschen 5600 Hz bis<br>11300 Hz (Oktavrauschen | 53             | 906                          | 60   | 168<br>(148)                        | 114<br>(94)                                    | nein                      |
| 8 KHZ), Dauer 5 s                               | 54             | 943                          | 60   | 168<br>(148)                        | 114<br>(94)                                    | nein                      |
| Ton 8115 Hz, Dauer 2 s                          | 55             | 979                          | 32   | 162                                 | 108  | ja                        |
| Transponder noch arbeitet)                      | 56             | 1016                         | 3.2  | 142                                 | 88   | ja                        |

## 4.5.4 Zusammenfassung und kurze Diskussion der Ergebnisse

Mit einem Ton in Bandmitte (8115 Hz) lag die Empfindlichkeit für sicheres Auslösen des Transponders bei 80 bis 90 dB re 1  $\mu$ Pa. Bei Messungen des Hintergrundschalls in der Nordsee haben Wille und Geyer bei Windgeschwindigkeiten von 25 bis 32 Knoten (13 bis 16.5 m/s) bei 8 kHz eine spektrale Leistungsdichte etwa 60 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz festgestellt ((Wille und Geyer 1984), Fig. 4). (Betke und Schultz-von Glahn 2008) haben im Gebiet *alpha ventus* ebenfalls Werte bis 60 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz bei 8 kHz gemessen. Im Aktivierungsfrequenzband von 8080 Hz bis 8150 Hz entspricht das 74 dB re 1  $\mu$ Pa. Gefordert ist für den Transponder, dass zum Auslösen ein Signal-Rauschabstand in diesem Band von höchstens 10 dB erforderlich ist, und zwar bei Windgeschwindigkeiten bis 15 m/s und dem damit verbundenen Hintergrundgeräuschpegel (Nissen 2004). Den Versuchen zufolge wird die dazu benötigte Empfindlichkeit also knapp erreicht.

An den Bandgrenzen nimmt die Empfindlichkeit rasch ab, beim Übergang von 8140 Hz nach 8150 Hz beispielsweise konnte der Transponder überhaupt nicht mehr aktiviert werden. Auf Signale im Band, die kürzer als die spezifizierte Mindestdauer von 1 s waren, reagierte der Transponder ebenfalls nicht.

Mit breitbandigen Signalen ließ sich der Transponder nicht auslösen. Durch starken Regen und durch nahe Schiffe können allerdings höhere Pegel am Transponder auftreten als die bei den Versuchen nach Tab. 12 erreichten. Die Immunität des Transponders gegen solche Geräusche wäre also ggf. noch einmal im Labor zu prüfen. Für Regengeräusche finden sich in der Literatur spektrale Leistungsdichten von 77 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz bei 40 mm/h Niederschlag bis über 85 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>/Hz bei 200 mm/h, jeweils für eine Frequenz von 8 kHz ((Nystuen u. a. 1993)), (Nystuen u. a. 2000), Im Aktivierungsfrequenzband bedeutet das einen Pegel von rund 95 bis 104 dB re 1  $\mu$ Pa. Sehr starker Regen bewirkt außerdem wie starker Seegang einen Eintrag von Luftblasen ins Wasser, was die Ausbreitungsdämpfung erhöht.

Bei Schiffen von 6 m bis 20 m Länge, wie sie in dieser Größe zum Übersetzen von Wartungspersonal zur Windenergieanlage eingesetzt werden, haben (Kipple und Gabriele 2003) einen 1/3-Oktav-Pegel bei 8 kHz von bis zu 168 dB re 1 µPa ermittelt (Quellpegel, @1 m). Bei 100 m Entfernung ergibt sich daraus nach Gleichung 6.4.1 im Aktivierungsband ein Pegel von 118 dB re 1 µPa. Von größeren Schiffen sind keine höheren Pegel zu erwarten. Sie erzeugen zwar insgesamt höhere Schallpegel, die Geräusche sind aber tieffrequenter und bei 8 kHz ist der Pegel in der Regel niedriger als der genannte.

# 4.6 Zeitliche Varianz des Ausbreitungspfades

## von Rainer Matuschek und Klaus Betke (ITAP)

Während der Messungen zur Bestimmung der Richtcharakteristik des Transponders an zahlreichen Positionen wurde der Unterwasserschall auch an zwei festen Punkten aufgezeichnet, um zeitliche Schwankungen des Transpondersignals zu dokumentieren.

# 4.6.1 Messmethode

Zur Messung wurden autonom arbeitende Aufzeichnungsgeräte benutzt (Abb. 40). Die Positionen dieser Messbojen sind aus Abb. 41 und Tab. 13 ersichtlich. Die bei den Arbeiten verwendeten Geräte sind in Tabelle 6.5.2 aufgelistet. Zur Auswertung wurden die aufgezeichneten Signale zunächst mit dem Programm Adobe Audition 1.5 bei 6 kHz mit 12 dB/Oktave hochpassgefiltert, um tieffrequente Störgeräusche zu entfernen. Für die weitere Analyse wurde die Software Matlab benutzt, dazu wurden in der Matlab-Programmiersprache entsprechende Skripte zur Berechnung von Pegelwerten aus Zeitfunktionen erstellt. Damit wurde aus allen Aufnahmen der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  in 0.25-

Sekunden-Schritten berechnet. Diese Daten wurden als Grundlage für Darstellungen mit längeren Mittelungszeiten und für Pegelstatistiken im Abschnitt "Ergebnisse" benutzt.



Abb. 40: Schallmessboje. Das Hydrofon befand sich etwa 2 m über dem Meeresboden.



Abb. 41: Lage der Messbojen

| Messboje | Datum        | Position                | Abstand und Richtung vom Transponder |
|----------|--------------|-------------------------|--------------------------------------|
| L        | 12.10.2010   | 54°00.001'N 06°37.720'E | 580 m östlich (94°) von AV12         |
| Q        | 12.10.2010   | 54°00.007'N 06°40.538'E | 3.7 km östlich (90°) von AV12        |
| R        | 23.02.2011   | 54°00.059'N 06°38.804'E | 1.8 km östlich (88°) von AV12        |
| V        | 2324.02.2011 | 53°59.201'N 06°34.792'E | 1.8 km südwestlich (212°) von AV10   |

Tab. 13: Positionen der autonomen Aufzeichnungsgeräte (Messbojen)

#### Tab. 14: Eingesetzte Geräte

| Gerät  | Hersteller   |
|--|--------------|
| 2 Messbojen mit kontinuierlicher Schallaufzeichnung im WAV-Format (16 Bit,<br>48 kHz Abtastfrequenz, Frequenzbereich 10 Hz bis 20 kHz) | itap         |
| Hydrofon TC 4033 (an Messboje L am 12.10.2010)   | Reson        |
| Kalibrierquelle (Pistonphone) 42AP mit Hydrofon-Kuppler  | G.R.A.S      |
| 2 Hydrofone 8106 (an Messbojen Q, R, V)  | Brüel & Kjær |
| Kalibrierquelle 4229 (Pistonphone) mit Kuppler für 8106  | Brüel & Kjær |
| Kalibrierquelle für Spannung und Ladung (100 pC <sub>rms</sub> )   | itap         |
| GPS-Gerät GPSmap 76cx  | Garmin       |

# 4.6.2 Ergebnisse

Abb. 42 zeigt Beispiele für den aufgezeichneten Schalldruck; für jede der vier Messpositionen ist ein 10-Sekunden-Burst des Transpondersignals dargestellt. Die Amplitude fluktuiert erheblich, in den Pegelwerten mit 0.25 s Mittelungszeit äußert sich dies wie in Abb. 43 und Abb. 44 gezeigt. In Abb. 45 sind die zeitlichen Pegelverläufe für die gesamten Messzeiträume dargestellt. Die kurzzeitigen Fluktuationen wurden hier durch eine Mittelungszeit von 3 Minuten unterdrückt. Dazu wurde der  $L_{eq}$  über die letzten drei Minuten von jeder der 5-minütigen Sendephasen des Transponders gebildet.

Die Pegelverteilungen an den vier Messpunkten sind in Abb. 46 in Form von Histogrammen dargestellt. Wenn man die Schwankungsbreite durch den Pegelbereich charakterisiert, in dem die Hälfte der Werte liegt (Differenz zwischen 75%- und 25%-Perzentil), ergeben sich 7 bis 9 dB für die Messungen im Oktober 2010 und 6 bis 8 dB für die Messungen im Februar 2011.



Abb. 42: Beispiele für Zeitfunktionen des Transpondersignals an den vier Messpositionen (L und Q am 12.10.2010, R und V am 23.02.2011. Boje L, Q und R lgen bei AV12, V bei AV10)



Abb. 43: Beispiele für den Pegelverlauf (Leq über jeweils 0.25 s) an Messposition L am 12.10.2010. Dargestellt ist der Beginn einer 5-minütigen Sendephase des Transponders mit dem stufenweisen Anstieg der Sendeleistung.



Abb. 44: Ausschnitt aus Abb. 43



Abb. 45: Zeitliche Pegelverläufe für die gesamten Messzeiträume. Jeder Datenpunkt stellt den Leq über die letzten 3 Minuten der 5-minütigen Aussendung des Transponders dar.



Abb. 46: Häufigkeitsverteilung der 0.25-Sekunden-Pegelwerte an den vier Messpunkten

## 4.6.3 Diskussion der Ergebnisse

Auffallend ist zunächst, dass die Empfangsamplitude zeitlich rasch schwankt. Das ist ein bekanntes Phänomen bei schmalbandigen Signalen. Die Ursache liegt in den Eigenschaften des Ausbreitungskanals im Flachwasser. Für eine einzelne Frequenz ist die Übertragungsfunktion (bzw. die Größe Transmission Loss) des Ausbreitungskanals räumlich stark variabel. Vor allem existieren durch destruktive Interferenz viele scharf lokalisierte Einbrüche der Übertragungsfunktion, also Stellen mit starker Ausbreitungsdämpfung.

Dieses Muster verändert sich bei kleinen Änderungen der Geometrie wie dem Abstand Sender-Empfänger oder der Wassertiefe. Bei rauer See sind die Einbrüche weniger stark ausgeprägt als bei glatter See ((Clay 1964)). Da sich die Geometrie durch den Seegang laufend leicht ändert, ist die Übertragungsfunktion auch zeitlich moduliert. Eine etwas geänderte Frequenz führt ebenfalls zu einem anderen Muster. Eine Folge davon ist z.B. gut in Abb. 42 zu erkennen: Die im Sekundentakt alternierenden, leicht unterschiedlichen Sendefrequenzen von 7500 Hz und 7800 Hz ergeben am Empfänger deutlich verschiedene Amplituden. Auch die langsame und teilweise gegenläufige Drift des Pegels, die in Abb. 45 an den Messpositionen L und Q zu sehen ist – an Q steigt der Pegel im Verlauf von 3 Stunden um etwa 7.5 dB an –, lässt sich mit dem Phänomen erklären. Durch die Tide ändert sich zum einen die Wassertiefe, zum anderen waren die Hydrofone nicht starr am Meeresboden befestigt, weshalb sich der Abstand zum Sender durch die wechselnde Strömung etwas ändern konnte.

Im Folgenden wird der Sachverhalt durch eine Simulation des Übertragungswegs mit einem Fast Field Program (FFP) illustriert ((Jensen u. a. 2011), Chapter 4). Es wurde der Programmcode FFLAGS (Fast Field Program for Layered Air Ground Systems) benutzt, der an der Open University in Milton Keynes, UK, entwickelt wurde ((Tooms u. a. 1993)). Aufgrund der Angaben in (Schuchardt u. a. 2008), S. 12ff) zum Sediment im Gebiet alpha ventus wurden für die FFP-Simulation folgende Parameter angesetzt: Korndichte = 2650 kg/m<sup>3</sup>, Porosität = 0.5,  $c_p = 1700$  m/s (Kompressionswellengeschwindigkeit) und  $c_s = 300$  m/s (Scherwellengeschwindigkeit). Es wurde mit einer Sender- und Empfängerhöhe von 15 m über dem Sediment und einer konstanten Schallgeschwindigkeit von 1504 m/s gerechnet.

Abb. 47 zeigt die so berechnete Ausbreitungsdämpfung für eine Entfernung bis 4 km. Die Ausschnitte in Abb. 48 für die oben erwähnten Messpositionen L (ca. 580 m Abstand vom Sender) und Q (ca. 3700 m) lassen erkennen, dass eine kleine Änderung der Geometrie, hier der Wassertiefe um einen Meter, im Detail zu einem völlig anderen Verlauf der Ausbreitungsdämpfung führen kann. Da bei dieser idealisierten Rechnung die Rauigkeit der Meeresoberfläche nicht berücksichtigt wurde, ist im realen Fall allerdings mit weniger starken Pegeleinbrüchen zu rechnen als in Abb. 47 und Abb. 48.



Abb. 47: Mit FFP-Verfahren berechnete Ausbreitungsdämpfung für eine Frequenz von 8 kHz und eine Wasser¬tiefe von 29 m. Zum Vergleich ist die Ausbreitungsdämpfung eingezeichnet, die sich nach der Formel nach (Thiele und Schellstede 1980) ergibt.



Abb. 48: Mit FFP-Verfahren berechnete Ausbreitungsdämpfung für zwei Entfernungsbereiche für eine Wassertiefe von 29 m (Ausschnitte aus Abb. 47) und für 30 m

## 4.7 Überlagerungseffekte

#### von Joachim Gabriel und Andrea Lübbben (DEWI)

Um Überlagerungseffekte beider Sonartransponder zu analysieren, wurde eine Messposition südwestlich der Windenergieanlage AV10 gewählt. Angestrebt wurde eine Position mit annähernd gleichen Immissionsbeiträgen von beiden Wandlern. Abb. 49 zeigt die geografische Lage der Transponder und die Messpositionen in bunt in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt. Die mittlere Entfernung der Messposition zum Sonartransponder an der AV10 beträgt etwa 1670 m, die zur AV12 etwa 2910 m. Mit einem Winkel der Messposition nach Westen von etwa 60° liegt diese in der Hauptabstrahlrichtung des Transponders an der AV10. Die Hauptabstrahlrichtung des Transponders an der AV12 befindet sich bei 90° relativ zu Nord, so dass der Winkel zwischen Messposition und Hauptabstrahlrichtung des Sonartransponders bei der AV12 etwa 150° beträgt.



Abb. 49: Geografische Lage von Sonartranspondern (AV10 und AV12) und Messpositionen (bunt) während der Vermessung von Überlagerungseffekten

Zur Messung der Überlagerungseffekte wurden beide Sonartransponder zeitversetzt ausgelöst. Anfänglich wurde der Transponder an der AV12 aktiviert. Etwa 100 Sekunden später wurde ebenfalls der Transponder an der AV10 ausgelöst. Damit ergibt sich ein Zeitraum überlagerter Signale von etwa 200 Sekunden. Es sind drei Betriebsphasen zu unterscheiden:

- Phase 1: Alleiniger Betrieb AV12
- Phase 2: Überlagerter Betrieb AV10 und AV12

• Phase 3: Alleiniger Betrieb AV10

Das Messprogramm erlaubt die Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Überlagerungen, wobei die Messergebnisse der Phasen 1 und 3 als Datenbasis für die Berechnungen herangezogen werden können. Die Darstellung in Abb. 50 zeigt ein Spektrogramm als Ergebnis einer FFT-Analyse aller drei Messphasen. Man erkennt anfänglich die Signale des Sonartransponders der AV12 bei 7500 und 7800 Hz. Ab etwa Sekunde 60 werden zudem die Signale des Transponders an der AV10 sichtbar. Sie liegen ein wenig verschoben bei 7530 und 7830 Hz. Diese Signale sind deutlicher zu erkennen und etwas breiter.



Abb. 50: Spektrogramm für die Zeit der Überlagerung der Sonarsignale

In Abb. 51 ist das Schmalbandspektrum für den Überlagerungszeitraum dargestellt. Das Spektrum ist ein 1-Minuten-Mittelwert mit 1 Hz Linienbreite und zeigt die signifikanten Peaks beider Signale. Das Schmalbandspektrum zeigt deutlich vier hervortretende Einzeltöne mit den Frequenzen 7500 Hz, 7530 Hz, 7800 Hz und 7830 Hz. Dabei sind die Töne bei 7500 Hz und 7800 Hz dem Transponder der AV12 zuzuordnen, während die beiden anderen Frequenzen von dem Sonartransponder der AV10 abgestrahlt werden. Die Pegel von AV10 sind deutlich höher, was mit der Messposition in Hauptabstrahlrichtung und der geringeren Entfernung zur AV10 erklärt werden kann. Wie erwartet wird die geringere Sendeleistung des Sonartransponders der AV10 durch die günstigere Position kompensiert. Zur Untersuchung der Überlagerungsproblematik wurden möglichst gleiche Pegelniveaus angestrebt.



Abb. 51: Schmalbandspektrum für die Überlagerung der Sonartransponder Signale von AV10 und AV12 (1-Minten-Mittelwert, 1 Hz Linienbreite)

Theoretisch kann bei der Überlagerung von frequenzgleichen Sinusschwingungen, die von zwei Punktschallquellen abgestrahlt werden, konstruktive und destruktive Interferenz auftreten. In der Realität der hier betrachteten Anwendung verwischt dieser Effekt jedoch durch zeitliche und räumliche Varianzen. Durch Reflektionen und Streuung gelangt Schall von jeder Quelle auf einer Vielzahl von Wegen zum Empfänger. Auch variiert die Ausbreitungsgeometrie, z.B. durch Wellen- und Hydrofonbewegung, ständig. Bei der Signalwellenlänge von ca. 20 cm ergibt sich bereits bei einer Verschiebung um 10 cm eine völlige Umkehr der Phasenlage. Angemerkt sei auch, dass weder die realen Schallquellen noch der reale Empfänger punktförmig sind.

Wie Abb. 51 zeigt, sind im vorliegenden Fall die Frequenzen der von den Sonartranspondern abgestrahlten Sinusschwingungen ohnehin stark unterschiedlich und erscheinen im Schmalbandspektrum als separate Linien. Entsprechend tritt keine messbare Überlagerung auf. Relevante Interferenzeffekte sind jedoch wegen der starken Inhomogenität der Schallausbreitungswege auch bei gleichen Sendefrequenzen nicht wahrscheinlich.

## 4.8 Vergleich mit Simulationsergebnissen

#### von Moritz Fricke (ISD)

Die Kenntnis der während der beiden Messkampagnen festgestellten Umgebungsbedingungen ermöglicht vergleichende Berechnungen der Übertragungsverluste anhand des entwickelten akustischen Simulationsmodells. Zur Abbildung des Einflusses von windbedingtem Blaseneintrag und Streuung an der Wasseroberfläche wurde für das Szenario der ersten Messkampagne eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5 m/s und für das Szenario der zweiten Messkampagne eine mittlere Windgeschwindigkeit von 10 m/s angenommen. In Abb. 52 sind die Ergebnisse aus Messung und Simulation dargestellt, die insbesondere für das Szenario der zweiten Messkampagne (Szenario "02/2011") eine gute Übereinstimmung zeigen. Extrapoliert man die Messergebnisse auf der Grundlage der im Rahmen der zweiten Messkampagne gemessenen Schallgeschwindigkeitsprofile und unter der Annahme einer mittleren Windgeschwindigkeit von 15 m/s, so ergibt sich für die Übertragungsverluste in der Simulation der in Abb. 52 in grün dargestellte Verlauf.



Abb. 52: Vergleich der gemessenen Übertragungsverluste mit Simulationsergebnissen; Extrapolation auf v\_wind=15m/s anhand des entwickelten Simulationsmodells

Erneut wird der große Einfluss der Wetterbedingungen auf die Übertragungsverluste deutlich. Die Extrapolation zeigt, dass unter ungünstigen Bedingungen ein Übertragungsverlust von 100 dB in einer Entfernung von etwa 4 km erreicht wird. Dies entspricht ungefähr der kritischen Entfernung von 2 NM, die in (Nissen 2004) genannt wird.

# 4.9 Diskussion und Schlussfolgerungen

## von Moritz Fricke (ISD)

Die Ergebnisse der beiden Messkampagnen im Testfeld *alpha ventus* zeigen eine deutliche Übereinstimmung mit den in Kapitel 3.5 beschriebenen Simulationsergebnissen. Das Szenario der Schallausbreitung bei einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s und einer signifikanten Wellenhöhe von 1,5 m, die in (Nissen 2004) als Maximalwerte angenommen wurden, konnte messtechnisch nicht erfasst werden. Die Extrapolation der Messdaten anhand des Simulationsmodells bestätigen jedoch, dass unter diesen Bedingungen mit einem Übertragungsverlust von etwa 100 dB in der kritischen Entfernung von 2 NM zu rechnen ist und so ein Quellpegel von 200 dB re 1µPa in 1m für eine sichere Detektierbarkeit erforderlich ist.

Die Messungen beim zeitgleichen Senden zweier Transponder zeigen, dass aufgrund der hohen zeitlichen und geometrischen Varianzen des Ausbreitungspfades nicht mit ausgeprägten destruktiven Interferenzerscheinungen zu rechnen ist.

# 5 Ökologische Bewertung (FKZ 0325104A)

von Christina Müller-Blenkle (BioConsult SH)

# 5.1 Einleitung und Fragestellung

Im Rahmen des RAVE-Forschungsprojektes am ersten deutschen Offshore-Windpark (*research at alpha ventus*) werden ein Reihe von Untersuchungen zu u.a. Technik und Sicherheit von Offshore-Windanlagen und deren ökologische Auswirkungen durchgeführt. In diesem Rahmen wird auch der Einsatz von Sonartranspondern getestet. Dies sind Sender, die an Windanlagen angebracht und von in Seenot geratenen U-Booten akustisch aktiviert werden können, um so im Notfall die Position der Windanlage zu signalisieren.

In der ökologischen Bewertung von Sonartranspondern sollen die zu erwartenden Auswirkungen des Transpondersignals auf die beiden im Gebiet vorkommenen marinen Säugetierarten Schweinswal (*Phocoena phocoena*) und Seehund (*Phoca vitulina*) untersucht werden. Der Schweinswal ist die einzige in deutschen Gewässern heimische Walart, der Seehund die häufigste Robbenart. In der Windparkregion von *alpha ventus* sind Schweinswale häufiger anzutreffen als Seehunde.

Die Auswirkungen der Sonartransponder auf Schweinswale und Seehunde sollen anhand der Charakteristik des Transpondersignals im Vergleich zum Hörvermögen der Tiere auf Grundlage bisheriger wissenschaftlicher Erkenntnisse zur Physiologie und zum Verhalten abgeschätzt und bewertet werden. Im Anschluss werden Vorschläge zur Minimierung der Auswirkungen entwickelt.

# 5.2 Akustische Eigenschaften der Sonartransponder

Die im Folgenden betrachteten Sonartransponder produzieren nach Aktivierung Signale im Frequenzbereich zwischen 7 und 8 kHz. Dabei werden mehrfach kurze (1 s) Sinustöne mit einem Frequenzsprung von 0,3 kHz abgespielt (7,0 und 7,3 bzw. 7,5 und 7,8 kHz). Inklusive Pausen wird das Signal für 5 Minuten präsentiert. Dauer und Wiederholungsrate der Signale können durch Programmierung variiert werden. Der maximale Quellpegel von 200 dB re 1µPa in 1 m wird nach einer Soft-Start-Phase (langsam ansteigender Schalldruckpegel) über 4 Signalzyklen erreicht. Der horizontale Öffnungswinkel des Gerätes beträgt ca. 120 °. Der Einsatz von Sonartranspondern ist für Notfallsituationen geplant, in denen ein U-Boot in der Umgebung eines Windparks manövrierunfähig und nicht in der Lage ist aufzutauchen (Nissen, pers. Kommunikation). Das Gerät verfügt über eine Selbsttestfunktion, die keine Schallpegel produziert.

Der sehr enge Frequenzbereich der Sonartranspondersignale unterscheidet sie von der Mehrzahl der anthropogenen Schallquellen im Meer, die eher breite Frequenzbereiche abdecken. Dabei können die drei Frequenzbereiche tief (10-500 Hz), mittel (0,5-25 kHz) und hoch (>25 kHz) unterschieden werden (Hildebrand 2009). Der größte Anteil von anthropogenem Schall im Meer wird im tief- und mittelfrequenten Bereich emittiert, wobei der mittelfrequente Bereich für Zahnwale und Robben von größerer Bedeutung ist als die tiefen Frequenzen. Auch die Sonartranspondersignale fallen in den mittelfrequenten Bereich. Weitere Schmalbandschallquellen sind Sonarsender sowie Vergrämungsge-räte (Pinger und seal scarer) (vgl. Kapitel 5.4.1).

Der am Offshore-Windpark *alpha ventus* getestete Sonartransponder mit einem Quellschallpegel von 200 dB re 1 $\mu$ Pa in1 m, erreichte bei den Messungen der Forschungspartner in einer Entfernung von 7400 m Schalldruckpegel von 129 dB re 1 $\mu$ Pa. An anderen Standorten kann es aufgrund von diversen

Umweltparametern, wie z.B. Wassertiefe und Untergrundbeschaffenheit zu Unterschieden in der Schallausbreitung kommen, die den Radius, in dem mögliche Effekte auf marine Lebewesen auftreten, verändern. Dies zeigte sich bereits in den Unterschieden in den beiden durchgeführten Messkampagnen, die unter unterschiedlichen Wetterbedingungen durchgeführt wurden und deutliche Unterschiede in der Schallausbreitung zeigen (siehe Kapitel 5.4.2). Modellierungen der Schallausbreitung sind daher schwierig und führen häufig zu deutlichen Abweichungen von gemessenen Werten wie (Bain und Williams 2006) anhand von Airgungeräuschen mit Abweichungen von mindestens 6 dB in unterschiedlichen Entfernungen zeigten.

Deutlich sichtbar aus den während des Vorhabens durchgeführten Messungen ist auch die Direktionalität des Transponders, die zu deutlich höherer Schalldruckpegel entlang der Ausbreitungsachse führt, verglichen mit den Werten außerhalb des Öffnungswinkels. Für Tiere mit guter Hörfähigkeit wird das Sonartranspondersignal jedoch auch außerhalb der vorgesehenen Ausbreitungsrichtung über große Distanzen wahrnehmbar sein.

Im Gegensatz zu seal scarern, bei denen neben der Grundfrequenz auch häufig deutlich ausgeprägte Harmonische in hohen Frequenzen bis etwa 100 kHz und Schalldruckpegeln von mehr als 145 dB re 1 $\mu$ Pa nachgewiesen wurden ((Lepper u. a. 2004), (Nedwell u. a. 2010)), fanden sich bei den Messungen an Sonartranspondern Harmonische bei niedrigeren Frequenzen von 15 bzw. 15,6 kHz und 22,5 bzw. 23,4 kHz. Diese Harmonischen enthielten mit 78 und 90 bzw. 70 und 77 dB re 1 $\mu$ Pa jedoch nur verhältnismäßig wenig Energie.



Abb. 53: Spektrogramm der Messung an Messpunkt A05 in 522 m Entfernung vom Sonartransponder. Die Messung erfolgte während der 2. Messkampagne unter relativ schlechten Wetterbedingungen.

## 5.3 Biologische Relevanz von Schall für marine Säugetiere

Schall ist von großer Bedeutung für viele marine Lebewesen, denn er ermöglicht Orientierung und Kommunikation und enthält biologisch relevante Informationen über die direkte sowie die entfernte Umgebung eines Tieres wie z.B. Wellenbewegungen, welche die Nähe der Küste anzeigen oder die Gegenwart von Räubern oder Beute (Richardson u. a. 1998). Die Schallgeschwindigkeit unter Wasser ist etwa 4,5 mal schneller als in Luft und besonders tieffrequenter Schall wird über sehr lange Distanzen transportiert (MacLennan und Simmonds 1992). Der akustische Sinn ist bei vielen Meerestieren sehr gut ausgeprägt, da der optische Sinn durch die begrenzte Sichtweite im Meer nur begrenzt nutzbar ist und in tieferen Wasserschichten Licht nicht oder nur spärlich vorhanden ist ((Tavolga 1974), (Kraan und van Etten 1995)). Weiterhin hat Schall den Vorteil, dass er aus allen Richtungen kommend empfangen werden kann und damit räumliche Informationen liefert.

Neben anderen marinen Tiergruppen wie z.B. Fischen und Krebstieren nutzen auch marine Säugetiere aktiv Schall zur Kommunikation. Dabei unterscheiden sich die geäußerten Laute art- und kontextspezifisch in Frequenzbereich und anderen Schallcharakteristiken (Southall u. a. 2009). Während Bartenwale im wesentlichen soziale Laute (z.B. Kontaktrufe, Mutter-Kind-Bindung, Partnersuche) produzieren, setzen viele Zahnwale zusätzlich Ultraschall zur Orientierung und zum Beutefang ein (Southall u. a. 2009). Die Rufe der Bartenwale können aufgrund ihrer tiefen Frequenz über sehr große Distanzen von hunderten von Kilometern wahrgenommen werden (Richardson u. a. 1998).

Auch Robben nutzen Schall im sozialen Kontext im Zusammenhang mit Paarungsverhalten, Mutter-Kind-Beziehung und Territorialverhalten (Richardson u. a. 1998). Der taktile Sinn hat bei Robben jedoch eine größere Bedeutung als der akustische, da sie mit ihren hochempfindlichen Barthaaren auch kleinste Wasserbewegungen z.B. entstanden durch die Bewegung eines Beutetieres wahrnehmen können. Dabei kann der Bereich in dem sie hydrodynamische Veränderungen verfolgen können die Distanz für optische oder akustische Wahrnehmung deutlich übersteigen (Hanke u. a. 2010).

Aufgrund der Bedeutung von natürlichem Schall für Organismen im Meer kann anthropogener Schall wie z.B. von Schiffen, seismischen Untersuchungen, Sonar, Explosionen und industriellen Aktivitäten zu deutlichen Beeinträchtigungen in unterschiedlichen Lebensbereichen führen, was in Kapitel 5.3.3 weiter ausgeführt wird.

## 5.3.1 Hörfähigkeit und Kommunikation bei Schweinswalen

Das Wissen über die Hörfähigkeit von Walen ist relativ begrenzt und bezieht sich im Wesentlichen auf Zahnwale, die in Gefangenschaft gehalten und trainiert werden können (Richardson u. a. 1998),(Nedwell u. a. 2004). Daten von Bartenwalen sind äußerst spärlich und basieren überwiegend auf Verhalten, Anatomie und Kommunikationsfrequenzen und nicht auf direkt gemessene Hörgrenzen an lebenden Tieren (Erbe 2002).

Wale werden in Bezug auf ihre Hörfähigkeit in 3 Kategorien eingeordnet. Dabei beziehen sich die Einstufungen tief- (7 Hz bis 22 kHz), mittel- (150 Hz bis 160 kHz) und hochfrequent (200 Hz bis 180 kHz) auf den Frequenzbereich den die Tiere wahrnehmen können (Southall u. a. 2009). Nach dieser Einordnung gehören Schweinswale, die Frequenzen zwischen 250 Hz und 180 kHz hören können (Kastelein u. a. 2002) in die Gruppe der hochfrequenten Zahnwale. Die beste Hörfähigkeit (definiert als der Bereich bis zu 10 dB oberhalb der größten Sensitivität) liegt im Bereich zwischen 16 und 140 kHz, wobei die niedrigste Hörschwelle von 33 dB re 1µPa 1 µPa bei Frequenzen zwischen 100 und 140 kHz bestimmt wurde (Kastelein u. a. 2002). In diesen Frequenzbereich fallen auch die von Schweinswalen produzierten Ultraschalllaute. Abb. 54 zeigt Audiogramme von Schweinswalen auf der Basis von Verhaltensstudien oder physiologischen Tests. Auffällig sind dabei die großen Abweichungen zwischen den verschiedenen Studien an Einzeltieren die die bestehenden Wissensunsicher-

heiten aufzeigen. Derzeit laufen weitere Forschungsvorhaben in Deutschland und den Niederlanden zur Bestimmung von Schädigungsschwellen.



Abb. 54: Audiogramme von Schweinswalen ermittelt durch Verhaltensstudien (V) ((Andersen 1970), (Kastelein u. a. 2002)) und Hirnstammaudiometrie (HS) ((Lucke u. a. 2004), (Lucke u. a. 2006), (Popov u. a. 2006))

Es ist möglich, dass die Hörfähigkeit der bisher getesteten Zahnwale im unteren Frequenzbereich von 1-10 kHz zu gering eingeschätzt wird, da die Hörfähigkeit an Tieren in Gefangenschaft in Versuchsbecken getestet wurde und es gerade im tieferfrequenten Bereich dort zu akustischen Störungen kommen kann (Cummings u. a. 1975).

## 5.3.1.1 Echolokation

Der Einsatz von Ultraschall ist weit verbreitet bei Zahnwalen und wird zur Orientierung in der Umgebung und beim Beutefang eingesetzt. Der Begriff Echolokation umfasst sowohl die Aussendung von Ultraschallsignalen, als auch die Wahrnehmung und Verarbeitung der Echos (Teilmann u. a. 2002). Dabei sind die Tiere in der Lage Größe, Position und Beschaffenheit von Objekten akustisch zu bestimmen (Au 1993) und Beute oder Hindernisse auch in völliger Dunkelheit zu erkennen (Sveegard u. a. 2008).

Der Abstand zwischen den einzelnen Klicksignalen wird je nach Entfernung des zu lokalisierenden Objektes angepasst, um im Zeitraum zwischen den Klicks das Echo des Objektes wahrnehmen zu können (Au 1993), (Teilmann u. a. 2002)). Aus der Klickgeschwindigkeit von aufgezeichneten Signalen könnte daher auf die vom Tier untersuchte Distanz geschlossen werden (Akamatsu u. a. 2005). Auch können Klickdauer, Frequenz und Schalldruckpegel variiert werden, um sich den gegebenen Umweltbedingungen (Hintergrundschall) anzupassen und das Ultraschallsignal bestmöglich nutzen zu können ((Richardson u. a. 1998), (Teilmann u. a. 2002)).

Verglichen mit anderen Zahnwalen wie z.B. dem großen Tümmler (*Tursiops truncatus*) ist die Echolokationsfähigkeit von Schweinswalen eher schlecht ausgeprägt (Kastelein u. a. 2002). Schweinswale nutzen Ultraschall mit höchster Energie im Bereich zwischen 125 und 135 kHz (Kastelein u. a. 1999) zur Orientierung und zum Beutefang (Møhl und Andersen 1973). In diesem Frequenzbereich ist der Hintergrundschallpegel besonders niedrig, so dass die Nutzung dieses Bereichs als Anpassung zur Verminderung von Maskierung gedeutet wird ((Kastelein u. a. 1999), (Madsen u. a. 2005)). Die Ultraschallsignale bestehen aus kurzen Klicklauten mit einer durchschnittlichen Dauer von 77  $\mu$ s (Teilmann u. a. 2002), die während der Untersuchung eines Objektes in ihrer Amplitude stark variieren (Kastelein u. a. 1999).

Die Reichweite von Schweinswal-Ultraschalllauten ist aufgrund ihrer hohen Frequenz und der damit verbundenen starken Absorption im Wasser gering, verglichen mit tieferen Ultraschalllauten anderer Zahnwalarten. Während sich die Energie bei 130 kHz-Lauten alle 30 m halbiert, ist dieses bei 20 kHz-Ultraschalllauten von Pottwalen alle 600 m der Fall (Madsen u. a. 2005).

Der Sendestrahl ist im Vergleich zu größeren Arten weiter gefächert, was durch die geringe Körpergröße der Tiere bedingt ist (Au u. a. 1999). Der weiter gefächerte Sendestrahl wird jedoch durch die höhere Frequenz des Signals, die eine bessere Ausrichtung ermöglicht teilweise ausgeglichen ((Au u. a. 1999), (Kastelein u. a. 2002)). Während Schweinswale in Gefangenschaft Ultraschallsignale von etwa 157 bis 170 dB re 1µPa<sub>(peak-peak)</sub> aussenden ((Au u. a. 1999), (Kastelein u. a. 2002)) fanden sich bei freilebenden Tieren Schalldruckpegel von 178 bis 205 dB re 1µPa<sub>(peak-peak)</sub> bei gleichbleibenden anderen Signalcharakteristika (Villadsgaard u. a. 2007). Damit haben Schweinswale einen niedrigeren Schalldruckpegel als die Signale größerer Arten, wie z.B. großer Tümmler mit einem Schalldruckpegel von 210-225 dB re 1µPa<sub>(peak-peak)</sub> (Au u. a. 1999). Es wurde auch bei anderen Arten beobachtet, dass im Freiwasser höhere Schallpegel produziert werden, was darauf zurückgeführt wird, dass die Tiere im Versuchbecken bei zu hohem Schalldruckpegel des Signals einem zu lauten Echo ausgesetzt wären und deshalb weniger Energie bei der Schallproduktion aussenden ((Au 1993) in (Villadsgaard u. a. 2007)).

## 5.3.1.2 Kommunikation

Hochfrequente Ultraschallsignale können aufgrund ihre kurzen Wellenlänge nur über kurze Distanzen (Urick 1983) und durch ihre hohe Direktionalität nur in sehr engen Bereichen entlang der Achse der Aussendungsrichtung wahrgenommen werden ((Richardson u. a. 1998), (Kastelein u. a. 2002), (Clausen u. a. 2010)) Für Kommunikationszwecke sind deshalb die von vielen Zahnwalen produzierten tieferfrequenten Pfiffe, Klicks und gepulste Töne besser geeignet, da sie im größeren Umkreis des Senders wahrgenommen werden können (Richardson u. a. 1998).

Bei Schweinswalen wurden neben den Ultraschallsignalen keine weiteren Laute, die der Kommunikation dienen könnten, nachgewiesen ((Lucke u. a. 2007), (Clausen u. a. 2010)). Zwar fanden sich in mehreren Studien neben den hochfrequenten Anteilen der Klicklaute auch Frequenzen zwischen 1,4 und 2,5 kHz, denen eine soziale Bedeutung zugeschrieben wurde (Møhl und Andersen 1973), jedoch zeigt eine neueren Studie von (Hansen u. a. 2008), dass diese tieffrequenten Anteile einen so geringen Energiegehalt haben, dass die Autoren eine Kommunikationsfunktion als eher unwahrscheinlich ansehen. (Hansen u. a. 2008) gingen davon aus, dass diese Frequenzen ein Beiprodukt der hochfrequenten Schallerzeugung darstellen und die in anderen Studien beobachteten Peaks in den tieferen Frequenzen auf technische Artefakte zurückzuführen sind. Der geringe Schalldruckpegel in tiefen Frequenzen wird von (Madsen u. a. 2005) als Vorteil gewertet, da dieser Frequenzbereich von Orcas zur Lokalisation von Schweinswalen als Beute genutzt werden kann, wohingegen die hohen Frequenzen um 130 kHz außerhalb des Hörbereiches von Orcas liegen.

Da Schweinswale in sozialen Verbänden leben, untersuchten (Clausen u. a. 2010) die Ultraschallklicks auf mögliche soziale Kommunikationskomponenten und fanden abweichende Wiederholungsmuster in

unterschiedlichen sozialen Situationen. So stieg z.B. die Wiederholungsrate während Aggression zwischen Mutter und Jungtier deutlich an im Vergleich zu Lauten, die bei freundlichem Körperkontakt produziert wurden (Clausen u. a. 2010). Die Autoren gehen daher davon aus, dass Schweinswale die Wiederholungsrate in ihren Ultraschallsignalen variieren, um akustisch zu kommunizieren. Der Schalldruckpegel von Ultraschallsignalen in Aggressionskontexten war mit 180 dB re 1 $\mu$ Pa<sub>(peak-peak)</sub> deutlich höher als die zur Echolokation eingesetzten Laute und schienen für den Empfänger der Signale unangenehm zu sein (Clausen u. a. 2010).

Auch die Existenz individueller Signaturen, die einzelne Tiere identifizieren, wird nicht ausgeschlossen, auch wenn sie auch aufgrund der geringen Anzahl von Individuen in den Versuchen nicht nachgewiesen werden konnte. Vermutlich spielt individuelle Erkennung bei Schweinswalen aber eine untergeordnete Rolle, da die Tiere einzeln oder in sehr kleinen Gruppen unterwegs sind (Clausen u. a. 2010).

Der Bereich, in dem die Signale wahrgenommen werden können, ist jedoch durch die starke Absorption im hohen Frequenzbereich und durch die Direktionalität der Signale sehr begrenzt. (Clausen u. a. 2010) kalkulierten auf der Basis von Signalen von in Gefangenschaft gehaltenen Schweinswalen Entfernungen für die Signalwahrnehmung, die sehr stark mit der Position und Ausrichtung der Tiere zueinander schwankten. Beste Kommunikationsmöglichkeiten existierten bei Tieren, die aufeinander ausgerichtet waren. Bei Abweichungen von dieser "Achse" ermittelten die Autoren bis zu 500 m Unterschied im Wahrnehmungsbereich, wobei diese Ergebnisse eventuell durch Ungenauigkeiten bei den aufgezeichneten Schalldruckpegeln beeinflusst wurden. Für Aggressions- und Annäherungslaute wurden Reichweiten von minimal von 1,5 bis 4 m und maximal 250 bis 320 m ermittelt. Diese Werte waren geringer als die Reichweiten von Kommunikationssignalen in anderen Kontexten die über minimal 7-11 und maximal 440 bis 530 m wahrnehmbar sein können. Dabei wurde beobachtet, dass die Reichweite der Signale durch Kopfbewegungen des Senders und damit Verminderung der Direktionalität erhöht wird. (Clausen u. a. 2010) begründeten die Unterschiede in der Wahrnehmungsdistanz zwischen Aggressions- und Kontaktrufen damit, dass Aggressionslaute von Artgenossen im direkten Umfeld wahrgenommen werden müssen, während Kontaktrufe auch an Tiere gerichtet sind, die sich weiter entfernt aufhalten und zur Lokalisation von z.B. Mutter und Jungtier oder anderen Sozialpartnern dienen.

Die von (Clausen u. a. 2010) errechneten Distanzen könnten bei wildlebenden Schweinswalen allerdings deutlich größer sein, da diese mit durchschnittlich 191 dB re  $1\mu Pa_{(peak-peak)}$  sehr viel lautere Echolokationssignale produzieren (Villadsgaard u. a. 2007), als sie bei bisherigen Studien in Gefangenschaft ermittelt wurden. Auf Grundlage der maximal ermittelten Schalldruckpegel von (Villadsgaard u. a. 2007) fanden (Clausen u. a. 2010) höchste Wahrnehmungsdistanzen von Echolokationssignalen von 1200 m, bei aufeinander ausgerichteten Tieren und 200 m wenn sie voneinander abgewandt waren.

## 5.3.2 Hörfähigkeit und Kommunikation bei Seehunden

Robben haben angepasst an ihre amphibische Lebensweise sowohl in Luft als auch unter Wasser ein gut ausgeprägtes Hörvermögen. Die meisten Robben haben ihre beste Hörfähigkeit im Bereich zwischen 1 und 20 kHz (National Research Council 2005). Bei Seehunden wurden die niedrigsten Hörschwellen zwischen etwa 1 kHz und 50 kHz bestimmt ((Mohl 1968), (Kastak und Schusterman 1998), (Kastelein u. a. 2008), (Kastelein u. a. 2009)). Die Audiogramme zweier Seehunde sind in Abb. 55



dargestellt. Im Vergleich zu Schweinswalen haben Seehunde einen weiteren Frequenzbereich, in dem sie ein gutes Hörvermögen besitzen, aber die Hörschwellen liegen deutlich höher (siehe Kap. 5.3.1).

Abb. 55: Audiogramme zweier Seehunde nach (Kastelein u. a. 2009)

#### 5.3.2.1 Kommunikation

Robben produzieren eine Vielzahl von unterschiedlichen Lauten über und unter Wasser, die im Wesentlichen mit Paarungsverhalten und sozialen Kontakten in Verbindung stehen ((Schusterman u. a. 1970), (Richardson u. a. 1998), (Schusterman u. a. 2000), (Schusterman und Van Parijs 2003)). Bei Seehunden präsentieren sich Männchen während der Paarungszeit mit Breitband-Brülllauten im Frequenzbereich zwischen 0,5 und 4 kHz (Hauptenergie unter 2 kHz ((Van Parijs und Kovacs 2002) in (Kastelein u. a. 2009)), die sie unter Wasser in von Weibchen häufig besuchten Gebieten produzieren (Børgesæter u. a. 2004). Dabei werden Töne vermutlich sowohl zur Attraktion von Weibchen, als auch als Aggressionszeichen gegenüber Konkurrenten genutzt (Hanggi und Schusterman 1994). Jungtiere halten durch individuelle Kontaktrufe im tieffrequenten Bereich zwischen 0,2 und 0,6 kHz mit ihren Müttern Kontakt (Khan u. a. 2006).

Im Gegensatz zu vielen Zahnwalen fehlt bei Robben die Fähigkeit zur Echolokation, obwohl sie unter vergleichbaren Bedingungen leben. Dies führen (Schusterman u. a. 2000) darauf zurück, dass das Ohr von Robben durch die Anpassung an die amphibische Lebensweise eine unter Wasser schlechter ausgeprägte Hörfähigkeit im hochfrequenten Bereich besitzt. Dafür haben die Tiere gut ausgeprägte optische und taktile Fähigkeiten (Schusterman u. a. 2000).

#### 5.3.3 Auswirkungen von Schall auf marine Säugetiere

Potentielle Auswirkungen von Schall auf marine Säugetiere werden schon seit langer Zeit diskutiert, nicht nur im wissenschaftlichen Bereich und bei Entscheidungsträgern, sondern auch in der Öffentlichkeit besonders wenn Walmassenstrandungen und z.B. militärische Sonartests in einen zeitlichen Zusammenhang gebracht werden. Mögliche Effekte können aber auch deutlich subtiler sein mit Verhaltensänderungen, die Auswirkungen auf Individuen oder Populationen haben (z.B. (Richardson u. a. 1998), (Erbe und Farmer 2000), (Southall u. a. 2000), (Koschinski u. a. 2003)).

(Richardson u. a. 1998) unterteilten den Bereich um eine Schallquelle in Zonen in denen je nach Entfernung von der Schallquelle und damit sinkendem Schalldruckpegel unterschiedliche Effekte zu erwarten sind. Dabei reicht das Spektrum von physiologischen Schäden aufgrund von sehr hohen Schalldruckpegeln über Verhaltensänderungen bis hin zur Zone, in der der Schall nur wahrnehmbar ist. Diesem Modell entsprechend werden im folgenden potentielle Effekte dargestellt.

#### 5.3.3.1 Physiologische Schäden

#### Gewebeschäden

Gewebeschäden, besonders in Organen mit luftgefüllten Hohlräumen können direkt durch sehr starke akustische Ereignisse, wie Explosionen ausgelöst werden. Aber auch weniger intensive Schallereignisse können zu Gewebeschäden führen, z.B. bei Bildung von Gasblasen im Gewebe, wie dieses bei gestrandeten tieftauchenden Schnabelwalen (Ziphiidae) beobachtet wurde. Das Krankheitsbild ähnelt dabei der beim Menschen beobachteten Taucherkrankheit. Es wurde deshalb vermutet, dass die Tiere in der Nähe von militärischen Sonarmanövern durch den Schall ihre üblichen Tauchmuster ändern, zu schnell auftauchen und sich dadurch Gasblasen im Gewebe bilden, oder sie aufgrund der Beschallung die Oberflächenpausen verkürzen und zu schnell wieder abtauchen ((Jepson u. a. 2003), (Jasny u. a. 2005), (Jepson u. a. 2005), (Wright u. a. 2007)). Die genauen Prozesse, die zum beobachteten Syndrom führen, sind allerdings noch unklar ((Piantadosi und Thalmann 2004), (Jasny u. a. 2005), (Jepson u. a. 2005)). Auch höherer Sauerstoffbedarf durch die erhöhte Herzrate in Stresssituationen könnte die Tiere vorzeitig an die Wasseroberfläche treiben (Wright u. a. 2007). Da Sonartransponder an Offshore Windanlagen in geringeren Wassertiefen betrieben spielen diese Effekte für die Einschätzung von Sonartransponderauswirkungen keine Rolle.

#### Hörschäden

Von besonderer Bedeutung bei der Einschätzung von Schallauswirkungen auf marine Säugetiere sind Hörschwellenverschiebungen, die sich in Verhaltensstudien, aber auch durch akustisch evozierte Potentiale (AEP) nachweisen lassen. Bei den Hörschwellenverschiebungen wird zwischen bleibenden (PTS=permanent threshold shift) und vorübergehenden (TTS=temporary threshold shift) Hörschwellenverschiebungen unterschieden. Während sich bei einer vorübergehenden Hörschwellenverschiebung die ursprüngliche Hörfähigkeit nach einem von Dauer und Art der Beschallung abhängigen Zeitraum wieder einstellt, weist ein Tier mit permanenter Hörschwellenverschiebung dauerhaft ein schlechteres Hörvermögen auf, da Haarzellen oder Nerven im Innenohr oder andere Strukturen im Ohr geschädigt sind (Southall u. a. 2009). Über die Frage, ab wann eine Beeinträchtigung des Hörvermögens als Verletzung im Sinne gesetzlicher Bestimmungen (BNatschtG, FFH-RL) zu werten ist, gibt es keine einheitliche Auffassung. Zu unterscheiden sind temporäre (TTS) oder permanente (PTS) Hörschwellenverschiebungen. Bei einer permanenten Hörschwellenverschiebung kann sicher von einer Verletzung ausgegangen werden, da diese pathologisch nachweisbar ist. TTS ist demgegenüber eine physiologische Ermüdung und pathologisch nicht nachweisbar. TTS gilt somit nicht als Verletzung im Sinne o.g. Bestimmungen. International üblich ist es, PTS als Verletzung zu akzeptieren. Das Umweltbundesamt schlägt demgegenüber vor, auch TTS als Verletzung zu werten ((Werner 2011)). Einigkeit besteht darüber, dass Hörschwellenverschiebungen marine Säugetiere beeinträchtigen und daher vermieden werden sollen. Hörschwellenverschiebungen können durch sehr laute Geräusche, wie z.B. Explosionen, oder durch weniger laute Geräusche, denen ein Tier über einen längeren Zeitraum ausgesetzt ist verursacht werden (Clark 1991). Informationen über Hörschäden bei marinen Säugetieren sind kaum vorhanden, da in Versuchen aus ethischen Gründen und durch die geringe Zahl von zur Verfügung stehenden Versuchstieren keine bleibenden Schäden induziert werden sollen (Kastak u. a. 2008).

Um trotz des bestehenden Mangels an PTS-Daten bei marinen Säugetieren Grenzwerte benennen zu können, haben (Southall u. a. 2009) auf der Basis von TTS-Daten von marinen Säugern und Wissen über Hörschäden bei terrestrischen Säugetieren Grenzwerte für permanente Hörschwellenverschiebungen errechnet. Dabei wird auch der Frequenzbereich, in dem die Tiere hören berücksichtigt so, dass z.B. bei Kleinwalen Schallanteile unterhalb von 200 Hz weniger stark in die Berechnung eingehen. Die Autoren gehen davon aus, dass Schall mit einem Peak-Level von 230 dB re 1 $\mu$ Pa bzw. einem Schallexpositionspegel (SEL = Sound Exposure Level) von 198 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s innerhalb einer 24-Stunden-Periode zu permanenten Hörschwellenverschiebungen bei Schweinswalen führen kann. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass diese Einschätzung von Zahnwalen, die ihre beste Hörfähigkeit im mittelfrequenten Bereich haben, abgeleitet wurde.

Für Robben liegen die Werte niedriger mit 218 dB re  $1\mu Pa_{peak}$  bzw. 186 dB re  $1\mu Pa^2$  s SEL (Southall u. a. 2009).

# 5.3.3.2 Vorübergehende Hörschwellenverschiebungen

Reversible Hörschwellenverschiebungen bedeuten für das Individuum für einen gewissen Zeitraum eine Beeinträchtigung in der Wahrnehmung der akustischen Umwelt und können u.a. zu einer Verminderung des Jagderfolges und zu einem höheren Risiko, einem Räuber zum Opfer zu fallen führen (MMC 2007).

Schalldruckpegel, die zu vorübergehenden Hörschwellenverschiebung führen wurden daher in den letzten Jahren als praktikable Werte zur Abschätzung der Reichweite schallbedingter Schädigungen bei marinen Säugetieren genutzt (Tougaard u. a. 2009).

In den Leitsätzen für die Anwendung der Eingriffsregelung innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone und auf dem Festlandsockel im Rahmen von § 58 Abs. 1 Satz 2 BNatSchG wurde ein Vorsorgewert von 160 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s SEL benannt, welcher durch die Untersuchung von (Lucke u. a. 2009), die bei simulierten Airgun-Versuchen an einem Schweinswal bereits bei einem SEL von 164 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s vorübergehende Hörschwellenverschiebungen zeigte, gestützt wird. Insgesamt existiert bei den Einschätzungen, ab wann es zu Hörschäden bei marinen Säugetieren kommen kann, noch Unsicherheiten, da nur wenige Studien vorliegen.

# 5.3.3.3 Verhaltensänderungen

Verhaltensreaktionen können kurze Unterbrechungen von Verhaltensweisen wie Ruhen, Futteraufnahme oder soziale Aktivitäten sein, aber auch kurz- oder langfristige Vergrämung aus lauten Gebieten (Richardson u. a. 1998). Dabei sind Verhaltensänderungen häufig mit höheren energetischen Kosten für das Tier verbunden (Southall 2005). Verhaltensreaktionen sind sehr variabel und hängen sowohl von externen als auch internen Faktoren ab (National Research Council 2005).

Zu internen Faktoren, die das Verhalten beeinflussen, gehören:

- Hörvermögen
- Motivation

- individuelle Schalltoleranz
- Erfahrung mit früheren Beschallungen, die Reaktionen verstärken oder vermindern können
- Alter und Geschlecht
- Anwesenheit von abhängigen Jungtieren

zu den externen Faktoren zählen

- Umweltfaktoren
- Position des Tieres (kann das Tier sich frei bewegen, oder ist es in irgendeiner Form in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt)
- Eigenschaften der Schallquelle (z.B. mobil oder stationär)

Aus der Hörfähigkeit der Tiere kann daher nicht sicher auf die Verhaltensreaktion und deren Stärke geschlossen werden.

Die Qualität des Habitates hat ebenfalls einen großen Einfluss auf mögliche Verhaltensänderungen. So vermindert der Mangel von potentiellen, gleichwertigen Ausweichgebieten die Motivation den Schall zu meiden. Dabei wird die Qualität eines Habitats nicht nur durch die Eigenschaften des Lebensraums (u.a. Nahrungsangebot, Konkurrenz, Räuberdruck) sondern auch durch die Energie, die ein Tier in das Habitat investiert hat (Territorialabgrenzung, Position in der Dominanzstruktur, Informationssammlung über das Gebiet) bestimmt (Gill u. a. 2001).

Habitatverschlechterungen beziehungsweise eine Vergrämung in schlechter geeignete Habitate können negative Effekte auf die Population haben, ohne dass deutliche Auswirkungen kurzfristig sichtbar werden (Bain und Williams 2006). So beobachteten (Lusseau u. a. 2009), dass Orcas (*Orcinus orca*) in Gegenwart von Schiffen weniger Zeit mit der Nahrungssuche verbrachten, während die Tiere mehr in Bewegung waren. Die Autoren vermuteten in der verminderten Nahrungsaufnahme einen Grund für die deutliche Abnahme der Individuenzahl der beobachteten Gruppe.

Während der Bauarbeiten für den Offshore-Windpark Horns Rev II wurde eine statistisch signifikante Verminderung der akustischen Aktivität von Schweinswalen, d.h. weniger Schweinswallaute pro Zeiteinheit verglichen mit der Phase vor den Bauarbeiten, in Entfernungen von bis zu etwa 18 km festgestellt, wobei der Effekt mit zunehmender Entfernung geringer wurde (Brandt u. a. 2011a). Auch die Dauer über die ein Effekt nach Ende der Beschallung nachgewiesen werden konnte, nahm mit der Entfernung ab und lag zwischen 24-72 Stunden in der Nähe (2,5 km) der Schallquelle und 10-23 Stunden in fast 18 km Entfernung. Die Verminderung der akustischen Aktivität kann dabei vermutlich sowohl auf verminderte akustische Aktivität von Individuen (und damit verbunden auch verminderte Orientierungsfähigkeit und verminderte Nahrungsaufnahme) als auch auf Vergrämung d.h. Verminderung der Anzahl der Tiere im Beobachtungsgebiet zurückgeführt werden (Brandt u. a. 2011a).

Effekte auf den Energiehaushalt wurden auch bei Untersuchungen am Atlantischen Nordkaper (*Eubalaena glacialis*) beobachtet, bei denen die Tiere während Beschallung mit einem Warnsignal (wechselnde kurze Reintöne in variabler Amplitude, Frequenzbereich 500 bis 2000 Hz) deutliche Veränderungen im Tauchverhalten zeigten (schnelleres Schwimmen, verkürzte Phasen der Nahrungsaufnahme) (Nowacek u. a. 2004). Verhaltensänderungen durch das Warnsignal wurden bereits bei Schalldruckpegeln von 133-148 dB re 1µPa ausgelöst. Schweinswale haben in verschiedenen Studien eine relativ niedrige Reaktionsschwelle auf verschiedene anthropogene Schallquellen wie z.B. Schiffsgeräusche, akustische Pinger, und Offshore-Windanlagen gezeigt (Zusammenfassung in (Lucke u. a. 2007) und (Kastelein u. a. 2010)).

Auch Seehunde zeigten in einer Reihe von Untersuchungen Vermeidungsverhalten gegenüber verschiedener Schallquellen wie z.B. seismischen Untersuchen und Vergrämungsgeräte (siehe Kapitel 5.4.1) ((Yurk und Trites 2000), (Bain und Williams 2006), (Kastelein u. a. 2006a), (Kastelein u. a. 2008)).

## 5.3.3.4 Maskierung biologisch relevanter akustischer Signale

Maskierung beschreibt den Effekt der Wahrnehmungsschwellenerhöhung für ein Signal durch ein anderes Signal. Der Maskierungseffekt ist dabei umso größer, je näher die Frequenzen der beiden Töne/Geräusche beieinander liegen (Southall u. a. 2000) und wenn beide Töne aus der gleichen Richtung kommen (Holt und Schusterman 2007). Maskierung erfolgt in einem sogenannten kritischen Frequenzband, d.h. ein Ton wird nur von Tönen maskiert, die in einem bestimmten Frequenzbereich um die wahrzunehmende Frequenz liegen (National Research Council 2005). Sehr laute Signale können aber auch Töne/Geräusche außerhalb des betreffenden Frequenzbandes maskieren (Richardson u. a. 1998). Die Breite dieses kritischen Frequenz des Bandes zu umfassen (Richardson u. a. 1998). Tiere mit sehr engen kritischen Frequenzbändern sind daher weniger anfällig für Störungen durch maskierende Signale (Sveegard u. a. 2008). Schweinswale haben im Gegensatz zu vielen anderen Säugern oberhalb von 22,5 kHz eine relativ konstante kritische Bandbreite von 3-4 kHz (Popov u. a. 2006), so dass die Maskierungseffekte mit der Frequenz nicht weiter ansteigen.

Maskierung kann schon in Bereichen unterhalb der Reaktionsschwelle von Tieren erfolgen, d.h. der Umkreis um eine Schallquelle herum in dem Maskierung stattfindet, kann größer sein, als der Bereich in dem Verhaltensreaktionen beobachtet werden können (MMC 2007).

So kann z.B.

- die Kommunikation während der Paarungszeit eingeschränkt sein, so dass potentielle Partner auf größere Entfernung nicht mehr wahrgenommen werden können.
- die Kommunikation zwischen Mutter und Jungtier gestört werden.
- bei der Futtersuche Beute schlechter erkannt bzw. bei in Gruppen jagenden Tieren die akustische Koordination der Jagdaktivitäten erschwert werden.
- eine konkrete Gefahr f
  ür das Überleben bestehen, wenn die Erkennung von Feinden oder sonstigen Bedrohungen behindert wird (MMC 2007).

Eine Reihe von Studien haben gezeigt, dass anthropogene Schallquellen zur Maskierung biologisch wichtiger Signale führen (z.B. (Clark u. a. 2009), Zusammenfassungen in (Richardson u. a. 1998), (National Research Council 2005)).

Einige marine Säugetiere haben Anpassungen entwickelt, um Maskierungseffekte zu vermindern. Eine gut ausgeprägte Fähigkeit zum Richtungshören, d.h. die Position von zwei überlappenden Schallquellen zu identifizieren kann Maskierungseffekte deutlich senken (Richardson u. a. 1998). Daher sind Tiere mit gutem Richtungshören wie Zahnwale weniger stark von Maskierung beeinträchtigt als z.B. Robben mit schlechter ausgeprägtem Richtungshören (Richardson u. a. 1998). Als direkte Reaktion auf Maskierung wurde in einigen Fällen die Erhöhung des Schalldruckpegels, sowie Veränderungen des Frequenzbereiches oder des Signalmusters bei der Lauterzeugung beobachtet ((MMC 2007), (Holt u. a. 2009)). Inwieweit Anpassungen möglich sind, hängt dabei von den Möglichkeiten zur Änderungen der Schallcharakteristik und vom notwendigen Energieaufwand, der damit verbunden ist ab (Jensen u. a. 2009).

## 5.3.3.5 Stress

Als Stress wird ein Zustand erhöhter Alarmbereitschaft des Organismus bezeichnet, der mit Änderungen im Hormonhaushalt und chemischen Abläufen im Körper verbunden ist und höhere Leistung ermöglicht. Während kurzfristiger Stress die Leistungsfähigkeit des Körpers steigert, wirken sich chronische Belastungen negativ auf den Organismus aus und reduzieren die Fitness. (McEwen und Stellar 1993) bezeichneten die Anpassungsvorgänge im Organismus auf äußere Faktoren als Allostase. Dabei reagiert der Organismus sowohl auf natürliche Änderungen (z.B. jahreszeitliche Wechsel, Änderungen im Nahrungsangebot, Fortpflanzung), als auch auf unvorhersehbare Ereignisse wie Verletzungen, Erkrankungen, oder anthropogene Störungen. Eine moderate Allostase ermöglicht die Anpassung an wechselnde Umweltbedingungen, aktiviert Energie und das Immunsystem. Ist die Reaktion zu stark oder hält lange an kommt es zu einer Überlastung, die die Autoren als "Allostatic Load" bezeichnen. Das Konzept der Allostase zeigt, dass die Auswirkungen eines Stressfaktors von vielfältigen Faktoren abhängen, die den Organismus gerade beeinflussen. Je näher sich ein Organismus an der Grenze zum "Allostatic Load" befindet desto geringer muss ein zusätzlicher Stressfaktor sein um schädliche Folgen zu haben, d.h. die Auswirkungen eines Faktors hängen von der Situation ab in der er eintritt (National Research Council 2005).

Die bisher aufgeführten Effekte von Schall, wie physiologische Schäden, Verhaltensänderungen und Maskierung sind Auswirkungen, die das Stresslevel von Individuen erhöhen, bzw. durch ein erhöhtes Stresslevel ausgelöst werden. Aber auch Schall auf niedrigem Niveau, der keine deutlich sichtbaren Effekte hat, kann für Tiere störend sein und Stress auslösen (Wright u. a. 2007).

Externe Faktoren können die Bedeutung des Stressfaktors beeinflussen. Zum Beispiel wird eine Vergrämung aus einem Habitat mit gutem Nahrungsangebot für Bartenwale einen besonders großen Stressfaktor darstellen, da sich die Tiere in den Sommermonaten in nahrungsreichen kalten Gewässern Fettreserven anlegen, die sie über die Wintermonate in warmen nahrungsarmen Gewässern bringen, wo die Jungtiere geboren werden. Verminderte Nahrungsaufnahme führt zu nicht ausreichenden Fettreserven, Stress, verminderter Fitness und daraus folgend zu Mangelernährung bei Jungtieren. Die gleiche Art der Beschallung könnte zu einem anderen Zeitpunkt z.B. während Migration oder auch im Winterhabitat zwar ebenfalls zu Vergrämung führen, die aber eventuell weniger starke Auswirkungen auf das Individuum/die Population hätte (National Research Council 2005). Durch Schall können auch Beutetiere vertrieben und damit das Nahrungsangebot verschlechtert werden (MMC 2007), was sich besonders negativ auf Tiere mit abhängigen Jungtieren auswirkt (Bejder u. a. 2009). Für marine Säugetiere fehlen aber bisher verlässliche Stressindikatoren besonders für langfristige Stressbelastungen (National Research Council 2005).

#### 5.3.3.6 Habituation

Die Reaktion von marinen Säugetieren auf Schallsignale nimmt häufig mit der Dauer der Schallpräsentation ab. Während das Signal am Anfang neu und potentiell gefährlich sein kann, tritt eine Gewöhnung (Habituation) ein, wenn das Signal keine Gefahr darstellt oder positive Effekte hat (Bejder u. a. 2009). So reagierten z.B. Seehunde nicht mehr auf Rufe von ihnen bekannten fischfressenden Orca-Populationen, wohingegen sie starke Reaktionen auf die Rufe von ihnen unbekannten fischfressenden Orca-Populationen aus anderen Regionen zeigten (Deecke u. a. 2002). Auch die Effekte von Vergrämungsgeräten lassen häufig nach, wenn sie für die Tiere keine akute Gefährdung darstellen bzw. führen zum gegenteiligen Effekt, wenn sie mit einer Nahrungsquelle in Verbindung gebracht werden ((Jefferson und Curry 1996), (Fertl 2009)).

Der Begriff der Habituation wird jedoch auch häufig fälschlicherweise für jegliche Änderung der Toleranzgrenze auf eine Störung genutzt und die Änderung in der Reaktion mit neutralen oder positiven Auswirkungen in Verbindung gebracht. Diese Interpretation kann zu Fehleinschätzungen über Auswirkungen von Störungen auf Tiere führen (Bejder u. a. 2009). Eine Änderung der Toleranzgrenze kann eine Folge mangelnder Alternativen für Individuen oder Populationen sein dem Schall auszuweichen bzw. der Aufwand dem Schall auszuweichen ist höher als die Kosten, die durch die veränderte Lebenssituation entstehen (vgl. Kapitel 5.3.3.3). So ist es möglich, dass die Tiere, die die geringste Reaktion zeigen, die sind, die keine Ausweichmöglichkeiten haben (Jasny u. a. 2005). Eine erhöhte Toleranz gegenüber einer Schallquelle kann daher mit höheren energetischen Kosten, Stress und reduzierter Fitness verbunden sein (Lusseau und Bejder 2007).

## 5.4 Einschätzung möglicher Effekte von Sonartranspondern auf marine Säugetiere

Sonartransponder haben, so wie Vergrämungsgeräte für marine Säugetiere und Sonargeräte, einen relativ engen Frequenzbereich in mittleren Frequenzen und unterscheiden sich damit von vielen anderen anthropogenen Schallquellen wie z.B. Schiffsmotoren, Offshore Windanlagen, oder seismischen Airguns, die überwiegend tieffrequenten Breitbandschall emittieren.

Von den akustischen Eigenschaften ähneln Sonartransponder besonders den bereits genutzten Pingern und seal scarern. Deshalb eignen sich Studien zu Auswirkungen von Pingern und seal scarern am ehesten, um potentielle Auswirkungen von Sonartranspondern auf Schweinswale und Seehunde einzuschätzen. Studien über Auswirkungen von Sonargeräten beziehen sich im wesentlichen auf größere Zahnwale (siehe Kapitel 5.3.3.1), während Daten zu Schweinswalen oder Robben nicht vorliegen und werden deshalb hier nicht im Detail behandelt.

## 5.4.1 Akustische Vergrämer (Pinger und seal scarer)

Pinger und seal scarer sind omnidirektionale Geräte, die gezielt meist gepulste Töne, häufig mit wechselnden Frequenzen und Zeitintervallen produzieren, um vorwiegend marine Säugetiere aus räumlich begrenzten Gebieten fernzuhalten.

## 5.4.1.1 Pinger

Pinger sollen kleine Wale vor Fischereinetzen warnen, da die Tiere nicht in der Lage sind die Netze über Entfernungen von mehr als ein paar Metern wahrzunehmen (Kastelein u. a. 2000) und so Beifang von Schweinswalen in er Fischerei minimieren (Jasny u. a. 2005). Sie werden auch eingesetzt, um z.B. Schweinswale von Unterwasserexplosionen fernzuhalten (Richardson u. a. 1998). Dabei werden sowohl tonale Geräte mit einer Frequenz von 10 kHz bei 130 bis 150 dB re 1 $\mu$ Pa, als auch solche, mit variablen Breitbandtönen zwischen 20 und 160 kHz in einer Lautstärke von 145 dB re 1 $\mu$ Pa eingesetzt. Es gibt unterschiedliche Einschätzungen zur Effektivität von akustischen Vergrämern auf Schweinswale. (Culik u. a. 2001) konnten in Freiwasserversuchen zeigen, dass Schweinswale einen deutlich größeren Abstand (durchschnittlich 530 m statt 150 m ohne Pinger) zu einem Netz mit Heringen hielten, wenn dieses mit einem Pinger ausgestattet war. Insgesamt näherte sich kein Schweinswal dem Pinger auf weniger als 130 m. Dabei lag der Frequenzbereich zwischen 20 und 160 kHz mit einem maximalen Schalldruckpegel von 145 dB re 1 $\mu$ Pa (300 ms Pulse in zufälligen Intervallen zwischen 5 und 30 s). Da die Tiere während Beschallung weder Schreckreaktionen, oder schnelleres Schwimmen zeigten, ihre Umgebung nicht intensiver mit Echolot untersuchten und scheinbar ihre Beutetiere nicht durch den Schall vertrieben wurden schließen die Autoren, dass Schweinswale durch den Schall gestört werden und deshalb das Gebiet um den Pinger meiden. Auch bei Pingern mit tieferen Grundfrequenzen zwischen 10 und 12 kHz, aber mit signifikanten Harmonischen bis zu 100 kHz und einem maximalen Schalldruckpegel von 132 dB re 1 $\mu$ Pa reduzierte sich der Beifang von Schweinswalen in Fischnetzen signifikant. (Gönener und Bilgin 2009) und auch weitere Untersuchungen kamen zu vergleichbaren Ergebnissen (z.B. (Trippel u. a. 1999), (Culik u. a. 2001), (Larsen u. a. 2002)), was auf eine Vergrämung der Tiere aus der direkten Umgebung der Netze schließen lässt.

(Cox u. a. 2001) beobachteten, dass die Anzahl von Schweinswalen um einen aktivierten Pinger (Breitband, regelmäßige Töne, Grundfrequenz 10 kHz, Minimum Quellschallpegel 132 dB re 1 $\mu$ Pa) innerhalb von etwa 10 Tagen wieder deutlich anstieg und deuteten diesen Effekt als eine Gewöhnung an den Schall. Die Autoren konnten aber nicht bestimmen, ob es sich um die gleichen Individuen handelte, die ins Gebiet zurückkehrten, oder um andere Tiere mit höherer Lärmtoleranz (siehe Kapitel 5.3.3.6).

Negative Auswirkungen auf Robben sind aufgrund der akustischen Eigenschaften von Pingern nicht zu erwarten. Sie können allerdings einen sogenannten "Dinner Bell" Effekt haben, wenn das Geräusch Robben auf eine Futterquelle aufmerksam macht. So stellten (Bordino u. a. 2002) signifikant häufigere Beschädigungen von Netzen durch Seelöwen (*Otaria flavescens*) fest, wenn diese durch Pinger zum Schutz gegen Beifang von Delfinen ausgestatten waren.

## 5.4.1.2 Seal scarer

Seehunde und Kegelrobben sind die Arten, die weltweit die meisten Schäden an Fischfarmen verursachen (Quick u. a. 2004). Deshalb wurden seal scarer entwickelt, die Robben durch hohe und für die Tiere unangenehme Schalldruckpegel von Aquakulturen oder Fischnetzen fernhalten und aus der Region vergrämen sollen ((Jacobs und Terhune 2002), (Jasny u. a. 2005)). Die erzeugten Schalldruckpegel können bei seal scarern 195 dB re 1µPa erreichen. Frequenzen können tonal und dauerhaft sein (z.B. 11 kHz) oder die Signale bestehen aus Abfolgen von kurzen Pulsen (2-12 ms) in Frequenzbereichen zwischen 5 und 30 kHz (Shapiro u. a. 2009) und können zusätzlich Ultraschallkomponenten enthalten. Durch die variablen Frequenzen und Zeitmuster soll eine Gewöhnung an die Töne verhindert werden.

Seal scarer tragen zu regionalen Schallerhöhungen insbesondere in Gegenden mit vielen Fischfarmen bei. Sie können auch andere marine Säugetiere als die Zielarten aus der Region vertreiben und an z.B. Meeresengen die Wanderbewegungen von marinen Säugetieren stören (Zusammenfassung in (Franse 2005)). (Morton und Symonds 2002) zeigten, dass verschiedene Orca-Populationen aus einem Gebiet mit seal scarern dauerhaft vertrieben wurden. Erst nachdem die Geräte nach mehreren Jahren entfernt wurden kehrten die Orcas innerhalb von 6 Monaten in das Gebiet zurück. (Lepper u. a. 2004) fassten zusammen, dass Zahnwale (speziell Schweinswale), Robben und vermutlich tauchende Meeresvögel am stärksten von seal scarern betroffen werden. Aber auch Reaktionen, wie die Änderung des Tauchverhaltens beim Atlantischen Nordkaper aufgrund eines Warnsignals ((Nowacek u. a. 2004), siehe Kap. 5.3.3.3) könnten beim Einsatz von seal scarern auftreten und zur Gefährdung von Tieren führen.

(Olesiuk u. a. 2002) beobachteten, dass sich Schweinswale sofort nach Aktivierung eines 10 kHz seal scarers (Pulsenergie 194 dB re  $1\mu$ Pa<sup>2</sup> <sub>peak-peak</sub>) aus der Umgebung der Schallquelle zurückzogen und ein Gebiet im Umkreis von mindestens 3,5 km überwiegend mieden. Über einen Zeitraum von 3 Wochen in denen der seal scarer für Versuche aktiviert und deaktiviert wurde zeigte sich keine Abnahme der Reaktionsstärke. Auch wenn der Beobachtungszeitraum verhältnismäßig kurz war, waren die Schweinswale in der weiteren Umgebung des Versuchsgebietes bereits seit bis zu einem Jahr anderen seal scarer nausgesetzt. Sollte es also zu Gewöhnungseffekten von Schweinswalen an seal scarer kommen, dann scheint es sich dabei um einen langfristigen Prozess zu handeln (Olesiuk u. a. 2002). Auch (Johnston 2002) beobachtete signifikant weniger Schweinswale im 1,5 km Umkreis um einen aktiven seal scarer als in Phasen, in denen das Gerät nicht aktiv war war (durchschnittlich 0.22±0.44 Tiere pro Beobachtungsdurchgang während Betrieb verglichen mit 2.91±1.29 Tieren, wenn das Gerät abgeschaltet war; P<0.05). Die Tiere näherten sich dem seal scarer auf nicht mehr als 645 m, was einem geschätzten Schalldruckpegel von 128 dB re 1µPa entsprach (Johnston 2002).

(Kastelein u. a. 2002) bestimmten für 2 verschiedene seal scarer (10-20 kHz und 15 kHz) eine leichte Verhaltensreaktion mit schnelleren Schwimmbewegungen und verstärkter Atmung eines Schweinswals bei 117 bzw. 121 dB re 1µPa und Meideverhalten bei 139 bzw 151 dB re 1µPa. Die Hörschwelle von 55 dB re 1µPa für die Signale wurde unter leisen Umwelt- und guten Ausbreitungsbedingungen für beide Signale in 91 km, unter lauten Umwelt- und schlechten Ausbreitungsbedingungen bei 14 bzw. 18 km unterschritten. Die Autoren berechneten einen Bereich von mindestens 0,2 bis maximal 1,2 km um eine Schallquelle in dem die Geräte effektiv sind zur Vergrämung von Schweinswalen. (Brandt u. a. 2011b) zeigten im Freiland deutliche Meidereaktionen auf seal scarer schon bei relativ niedrigen Schalldruckpegeln von 117 dB re 1µPa.

Seal scarer können bei Schweinswalen auf kurze Distanz Hörschäden auslösen. (Brandt u. a. 2011b) berechneten auf der Basis der von (Southall u. a. 2009) festgelegten Grenzwerte für permanente Hörschäden von 198 dB re  $1\mu$ Pa<sup>2</sup>s, die sie aufgrund der Ergebnisse von (Lucke u. a. 2009) auf 179 dB re  $1\mu$ Pa<sup>2</sup>s anpassten. Der Grenzwert von 179 dB re  $1\mu$ Pa<sup>2</sup>s wurde dabei in einer Entfernung von 10 m nach 12 Sekunden erreicht, auf 100 m nach 30 Minuten. Halten sich Schweinswale bei der Aktivierung eines seal scarers also in direkter Umgebung (um 10 m) des Gerätes auf, kann es zu Schädigungen kommen, da das Tier den Bereich nicht schnell genug verlassen kann. In einem Bereich von 100 m würden Schäden nur auftreten wenn der Schweinswal im Umkreis verbleibt, was aber aufgrund bisheriger Untersuchungen ((Johnston 2002), (Olesiuk u. a. 2002), (Brandt u. a. 2011b)) unwahrscheinlich ist, da die Tiere einen deutlich größeren Umkreis um die seal scarer meiden.

Auf der Basis des von (Southall u. a. 2009) angegebenen Grenzwertes für permanente Hörschäden bei Robben im Wasser von 186 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s und den Kalkulationen (Brandt u. a. 2011b) würde der SEL Grenzwert in 10 m Entfernung nach etwa 90 Sekunden erreicht sein, während er in einer Entfernung von 100 m erst nach knapp 2 Stunden überschritten wäre. Der SEL-Grenzwert für vorübergehende Hörschwellenverschiebung liegt 15 dB unter dem PTS-Wert und wird in einer Entfernung von 100 m nach ca. 250 s, in 300 m nach 30 Minuten erreicht. Die Effektivität von seal scarern wird immer wieder in Frage gestellt und während einige Studien positive Effekte aufzeigen, deuten die Ergebnisse anderer Studien auf Gewöhnungseffekte hin oder zeigen keine klaren Verhaltensänderungen in der Nähe der Geräte.

(Yurk und Trites 2000) beobachteten, dass signifikant weniger Seehunde (durchschnittlich 0,4 Tiere während Beschallung und 8 Tiere ohne Beschallung) in einem Gebiet auf Lachsjagd gingen, wenn ein seal scarer in Betrieb war, als in Zeiten, in denen das Gerät abgeschaltet war. Dabei wurde ein Umkreis von 50 m um das Gerät fast vollständig gemieden. Die Autoren gingen aber davon aus, dass für die Fischereiwirtschaft positive Effekte aufgrund der Lernfähigkeit von Robben mit der Zeit abnehmen könnten (Yurk und Trites 2000). Bei Kegelrobben beobachteten (Graham u. a. 2009), dass die Tiere bei Einsatz eines seal scarers in einem Fluss zwar das Untersuchungsgebiet nicht verließen, sich aber nicht weiter den Fluss hinauf bewegten, in dem sie sonst Lachse fingen. In einer 3-jährigen Studie führten seal scarer zu deutlich geringeren Fischverlusten durch Kegelrobben (*Halichoerus grypus*) in der Ostsee im Vergleich zu Netzen ohne akustische Vergrämungsgeräte (Fjälling u. a. 2006).

(Kastelein u. a. 2010) ermittelten in Versuchen mit 2 verschiedenen seal scarern (10-20 kHz und 15 kHz) bei zwei Seehunden Hörschwellen für das Signal von 60 bis 66 dB re 1 $\mu$ Pa. Simulationen ergaben, dass die Signale für Seehunde unter leisen Umwelt- und guten Ausbreitungsbedingungen 91 bzw. 99 km und unter lauten Umwelt- und schlechten Ausbreitungsbedingungen 14 bzw. 17 km hörbar wären. Leise Umwelt- und gute Ausbreitungsbedingungen liegen dann vor, wenn wenig Seegang und wenig Wind vorherrschen und keine Erhöhung des Hintergrundpegels durch Schiffe besteht. Leichte Verhaltensänderungen, wie das sich von der Schallquelle entfernen, zeigten sich bei 124 bzw. 133 dB re 1 $\mu$ Pa, stärkeres Meideverhalten gegenüber der Schallquelle mit erhöhter Schwimmgeschwindigkeit und häufigerem Auftauchen trat bei 134 bzw. 138 dB re 1 $\mu$ Pa auf. Aus den Ergebnissen folgerten die Autoren, dass ein Vergrämungseffekt im Bereich von mindestens 0,2 bis maximal 4,1 km existiert.

(Jacobs und Terhune 2002) konnten keine Änderung im Verhalten von Seehunden feststellen, wenn ein seal scarer aktiviert wurde und beobachteten Tiere, die sich dem Gerät bis auf 45 m näherten oder nah daran vorbei schwammen. Messungen zeigten allerdings, dass die Geräte nur 172 dB re 1µPa Quellschallpegel erreichten und damit 23 dB unter dem erwarteten Wert für neue seal scarer lagen. Daraus ergaben sich Schalldruckpegel von etwa 140 dB re 1µPa in einer Entfernung von 40 m von der Schallquelle, was etwa 70 dB oberhalb der Hörschwelle im Frequenzbereich des seal scarer liegt (Jacobs und Terhune 2002). Die Autoren berechneten, dass die Geräte bis in eine Entfernung von 1 bis 20 km deutlich wahrnehmbar sein müssen, dass eine Schmerzgrenze jedoch für die meisten Regionen nicht erreicht wurde.

Seal scarer können allerdings auch entgegengesetzte Wirkung zeigen, wenn deren Geräusch mit einer Futterquelle in Verbindung gebracht wird. So wurde beobachtet, dass nach einer anfänglichen Vergrämung von Robben Tiere durch den Schall angelockt werden und die seal scarer als "Dinner Bell" wirkten ((Jefferson und Curry 1996), (Fertl 2009)).

(Kastelein u. a. 2006a) hat verschiedene in seal scarern genutzte Frequenzen (zwischen 8 und 45 kHz) an Seehunden in einem Versuchsbecken getestet und signifikantes Meideverhalten gegenüber dem Schall nachgewiesen, d.h. die Tiere mieden den Bereich um die Schallquelle und entfernten sich weitestmöglich vom Schall. Dabei nahm die Reaktionsstärke mit der Zeit ab. Die Autoren berechneten aus den Ergebnissen unter Einbeziehung von Hintergrundschall eine Schwelle von 133 bis 141 dB re 1 $\mu$ Pa<sub>(peak)</sub>, an der der Schall für die Tiere unangenehm wird. Dabei war die Grenze für die

beiden Frequenzen 16 und 32 kHz mit 133 bzw. 135 dB re 1µPa deutlich niedriger als für 8 und 45 kHz, mit 141 dB re 1µPa. (Kastelein u. a. 2006a) wiesen allerdings auch noch einmal darauf hin, dass die Reaktion von vielen verschiedenen individuellen Faktoren abhängt und daher nicht einfach auf die gesamte Art übertragen werden kann. Weiterhin würde die Motivation sich einer Schallquelle zu nähern auch davon abhängen, ob dort z.B. Nahrung vorhanden ist, wohingegen sich die Tiere in den Versuchen in einer ökologisch neutralen Zone befanden ohne zusätzlich positive oder negative Einflüsse (Kastelein u. a. 2006b). Die Tiere vermieden Regionen mit höherem Schalldruckpegel vermutlich, da ihnen der Schall unangenehm war, aber es ist durchaus möglich, dass sie den Schall z.B. für eine Futterquelle tolerieren würden (Kastelein u. a. 2006b). So können Vergrämungsgeräte für die Mehrzahl von Robben wirksam sein, aber einzelne Individuen, die eine höhere Toleranzgrenze zeigen lassen sich erst durch sehr laute Signale von der attraktiven Futterquelle vertreiben (Kastelein u. a. 2006b).

## 5.4.2 Mögliche Effekte von Sonartranspondern

Bei den hier zu bewertenden Sonartranspondern handelt es sich um Notfallsysteme, die nur im Falle eines U-Boot Notfalls Schall emittieren sollen, um dem U-Boot die Position der Windanlagen zu signalisieren. Ein Einsatz der Geräte sollte daher wenn überhaupt nur sehr selten erfolgen (I. Nissen, pers. Kommunikation). Die Warnreichweite der Signale sollte mindestens 2 Seemeilen (3,7 km) betragen (Nissen 2004). Im Rahmen des Vorhabens wurden Messungen an einem WISO TH-ST01 Sonartransponder (Öffnungswinkel 120°) der Firma Thales durchgeführt, der in etwa 14 m Wassertiefe an Windanlage AV12 gefestigt wurde. Messungen wurden in einem Halbkreis von 180° durchgeführt, so dass sowohl entlang der Ausbreitungsrichtung des Schalls als auch in die entgegengesetzte Richtung Messdaten vorliegen. Die Entfernungen der Messpunkte lagen dabei zwischen 900 und 7200 m von der Schallquelle. Messungen wurden in zwei unterschiedlichen Kampagnen durchgeführt, wobei die erste während sehr guter Wetterbedingungen, was zu deutlich reduzierter Schallausbreitung im Vergleich zur ersten Kampagne führte. Beim Vergleich der Messwerte sollten die Abweichungen in den Entfernungen von der Schallquelle beachtet werden. Die Ergebnisse der beiden Messkampagnen sind in Tab. 15 zusammengestellt.

| R <sub>soll</sub> |                | 0°                                 | 90°  | 180°                      |
|-------------------|----------------|------------------------------------|--|---------------------------|
|                   | Messkampagne 1 | 145 dB re 1 $\mu$ Pa<br>(R:==900m) | 131 dB re 1 $\mu$ Pa<br>(R <sub>in</sub> =1046m) | Х                         |
| 900m              |                | (itist >00m)                       | (reist rorom)                                    |                           |
|                   | Messkampagne 2 | 145 dB re 1µPa                     | 123 dB re 1µPa                                   | Х                         |
|                   |                | (R <sub>ist</sub> =922m)           | (R <sub>ist</sub> =948m)                         |                           |
|                   | Messkampagne 1 | 139 dB re 1µPa                     | 129 dB re 1µPa                                   | Х                         |
| 1800m             |                | (R <sub>ist</sub> =2037m)          | (R <sub>ist</sub> =1900m)                        |                           |
|                   | Messkampagne 2 | 138 dB re 1µPa                     | 115 dB re 1µPa                                   | Х                         |
|                   |                | (R <sub>ist</sub> =1845m)          | (R <sub>ist</sub> =1868m)                        |                           |
| 3600m             | Messkampagne 1 | 137 dB re 1µPa                     | 121 dB re 1µPa                                   | 108 dB re 1µPa            |
| 500011            |                | (R <sub>ist</sub> =3792m)          | (R <sub>ist</sub> =3513m)                        | (R <sub>ist</sub> =3290m) |

Tab. 15: Ergebnisse der hydroakustischen Messungen in unterschiedlichen Ent-fernungen vom Sonartransponder

| R <sub>soll</sub> |                | 0°                        | 90°                       | 180°                      |
|-------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|                   | Messkampagne 2 | 124 dB re 1µPa            | 103 dB re 1µPa            | Х                         |
|                   |                | (R <sub>ist</sub> =3796m) | (R <sub>ist</sub> =3513m) |                           |
|                   | Messkampagne 1 | 129 dB re 1µPa            | 103 dB re 1µPa            | 104 dB re 1µPa            |
| 7200m             |                | (R <sub>ist</sub> =7400m) | (R <sub>ist</sub> =7259m) | (R <sub>ist</sub> =6600m) |
|                   | Messkampagne 2 | 105 dB re 1µPa            | 94 dB re 1µPa             | Х                         |
|                   |                | (R <sub>ist</sub> =7190m) | (R <sub>ist</sub> =7196m) |                           |

Schalldruckpegel (rms gemittelt über 5 s) in unterschiedlichen Entfernungen vom Sonartransponder entlang der Ausbreitungsachse (0°), im 90° Winkel zur Ausbreitungsachse und entgegen der Ausbreitungsachse (180°).  $R_{soll}$  ist der geplante  $R_{ist}$  der reale Radius von der Schallquelle. Wetterbedingungen: Messkampagne 1 Wind < 3 Bft, Wellen < 0,5m), Messkampagne 2 Wind 6-7 Bft, Wellen 2m

# 5.4.2.1 Hörschäden

Nach dem von (Brandt u. a. 2011b) genutzten Grenzwert von 179 dB re  $1\mu Pa^2s$  für permanente Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen (vgl. Kapitel 5.4.1) können bei einem Quellschallpegel des Sonartransponders von 200 dB re  $1\mu Pa$  bis in eine Entfernung von etwa 15 m von der Schallquelle Hörschäden nicht ausgeschlossen werden, wenn die Tiere während des Betriebs in diesem Bereich verbleiben. Bei Seehunden ist dieser Bereich mit etwa 7 m noch kleiner. Temporäre Hörschwellenverschiebungen könnten bei Schweinswalen in einem Bereich von 100 m, für Seehunde bis 50 m auftreten, wenn die Tiere in dem Umkreis verbleiben.

Da der Transponder nur in Notfällen für relativ kurze Zeiträume betrieben wird, ist jedoch zu erwarten, dass die Tiere das für sie neue Signal als potentielle Gefahr ansehen, sich von der Schallquelle entfernen und damit den höchsten Schalldruckpegeln, die zu Hörschwellenverschiebungen führen können ausweichen. Untersuchungen an seal scarern zeigten, dass der Meidebereich um die die Schallquelle herum deutlich größer ist als der Bereich in dem Hörschäden auftreten können. Die Schallausbreitung des Sonartransponders ist direktional, so dass die Schalldruckpegel abseits der Hauptausbreitungsachse geringer sind und damit auch der Umkreis für mögliche Hörschwellenverschiebungen in diesem Bereich abnimmt.

# 5.4.2.2 Verhaltensreaktionen

Die Transpondersignale werden sowohl für Schweinswale als auch für Seehunde über weite Distanzen hörbar sein und können zu Verhaltensänderungen führen. Werden Beobachtungen aus seal scarer Untersuchungen an Schweinswalen ((Brandt u. a. 2011b), (Kastelein u. a. 2010)) auf die in diesem Vorhaben gewonnenen Messwerte übertragen, dann sind unter guten Wetter- und Ausbreitungsbedingungen deutliches Meideverhalten, d.h. Verlassen des Bereichs im Bereich bis zu 7 km und starke Verhaltensreaktionen, wie schnelles Schwimmverhalten und längere Unterbrechnung des normalen Verhaltens, über Distanzen von mehr als 10 km entlang der Schallausbreitungsachse des Transponders zu erwarten über Distanzen von mehr als 10 km entlang der Schallausbreitungsachse des Transponders zu erwarten. (Brandt u. a. 2011b) wiesen leichtere aber statistisch signifikante Verhaltensreaktionen wie die Änderung der akustischen Aktivität bei relativ niedrigen Schalldruckpegeln von 117 dB re 1µPa nach, die bei guten Wetterbedingungen während des Sonartranspondereinsatzes in mehr als 12 km Entfernung entlang der Ausbreitungsachse zu erwarten sind.

Für Seehunde wurden deutliche Verhaltensänderungen, d.h. die Tiere mieden den Bereich um die Schallquelle, während des Betriebs von seal scarern für Schalldruckpegel von 134-138 dB re 1µPa beobachtet (Kastelein u. a. 2010). Diese Werte wurden bei den Messungen unter guten Wetter- und Ausbreitungsbedingungen in 3,7 km Entfernung erreicht. Leichte Verhaltensänderungen sind aufgrund der Daten von (Kastelein u. a. 2010), in einer Entfernung von mehr als 6 km entlang der Hauptausbreitungsachse des Sonartranspondersignales zu erwarten. Eine Grenze an der ein 8 kHz Ton unangenehm für Seehunde wäre, bestimmten Kastelein et al. (2006a) mit 141 dB re 1µPa, was bei den Messergebnissen dieses Vorhabens einer Entfernung von etwa 2 km entlang der Ausbreitungsachse des Schalls entspräche, die die Seehunde vermutlich meiden würden. Die Einschätzungen der Auswirkungen von Sonartranspondern auf Schweinswale und Seehunde sind in Tab. 16 zusammengefasst.

|             | TTS   | Vergrämung                   | Starke Verhaltensände-        | Leichte Verhaltens-            |
|-------------|---|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|             | gute Wetterbedin-   | gute Wetter-                 | rungen                        | änderungen                     |
|             | gungen  | bedingungen                  | gute Wetter-                  | gute Wetterbedingungen         |
|             |   |                              | bedingungen                   |                                |
| Schweinswal | Wenige Meter un-<br>wahrscheinlich,<br>aber nicht ausge-<br>schlossen | bis 7 km<br>(130 dB re 1µPa) | bis 10 km<br>(124 dB re 1µPa) | bis 12 km<br>(<119 dB re 1µPa) |
| Seehund     | Wenige Meter un-<br>wahrscheinlich,<br>aber nicht ausge-<br>schlossen | bis 2 km<br>(142 dB re 1µPa) | bis 4 km<br>(136 dB re 1µPa)  | bis 6 km<br>(133 dB re 1µPa)   |

# Tab. 16: Einschätzung der Entfernung, in der Auswirkungen von Sonartranspondern auf Schweinswale und Robben auf der Basis der Messwerte zu erwarten sind

Beim Testeinsatz mit einem Gerät werden vermutlich nur einzelne Individuen betroffen sein. Eine standardmäßige Ausrüstung von Offshore-Windparks mit Sonartranspondern und dementsprechend häufigere Einsätze/Tests würden potentiell negative Auswirkungen erhöhen.

Da Sonartransponder aber nur selten und über kurze Zeiträume aktiviert werden sollen, sollten die Geräte nur temporäre Auswirkungen haben. Bei Summierung mehrerer negativer Effekte und vorbelasteten Tieren können die Auswirkungen jedoch stärker ausfallen (vgl. Kapitel 5.3.3.5).

# 5.4.2.3 Maskierung biologisch relevanter Signale

Die Hörschwelle von Schweinswalen für Transpondersignale von 8 kHz liegt bei etwa 59 dB (Kastelein u. a. 2002) und damit deutlich oberhalb des Bereichs des besten Hörens. Das Transpondersignal wird für die Tiere trotz der höheren Hörschwelle über weite Entfernungen wahrnehmbar sein und der in 7,4 km Entfernung vom Transponder gemessene Schalldruckpegel von 129 dB unter guten und 105 dB re 1 $\mu$ Pa unter schlechten Ausbreitungsbedingungen liegt deutlich oberhalb dieser Hörschwelle. Die engbandigen Sonartranspondersignale können Töne maskieren, die sich in einem ähnlichen Frequenzbereich befinden. Akustische Umweltinformationen wie z.B. das Geräusch von Brandung, das auf die Küstenlinie hinweist, sind eher tieffrequent, so dass eine Maskierung durch die Transpondersignale eher unwahrscheinlich ist.

Die Ultraschalllaute, die von Schweinswalen für die Echoortung genutzt werden und auch intraspezifische Kommunikationskomponenten enthalten (Clausen u. a. 2010) liegen weit oberhalb der von Sonartranspondern emittierten Frequenzen und deren Harmonischen, so dass eine Maskierung in diesem Bereich nicht zu erwarten ist.

Bei Seehunden befinden sich die Sonartranspondersignale und deren Harmonische im Bereich der besten Hörfähigkeit zwischen 0,5 und 40 kHz (Kastelein u. a. 2009). Die Hörschwelle bei 8 kHz liegt bei etwa 60 dB, so dass auch Seehunde das Transpondersignal über den gemessenen Umkreis von 7,4 km hinaus wahrnehmen können.

Die Breitbandkommunikationslaute bei Seehunden liegen im Bereich zwischen 0,5 und 4 kHz und damit unterhalb der Frequenz der Sonartranspondersignale. Eine Maskierung von Kommunikationslauten durch die Transponder ist daher nicht zu erwarten.

# 5.4.3 Vorschläge zur Minimierung von Auswirkungen auf marine Säugetiere

Bei der Bewertung möglicher Auswirkungen muss zwischen zwei unterschiedliche Situationen unterschieden werden:

- 1. den Betrieb eines Sonartransponders ausgelöst von einem in Not geratenen U-Boot
- 2. Tests zur Funktionstüchtigkeit der Sendeanlagen

Im ersten Fall handelt es sich um einen ungeplanten Einsatz der Anlage, so dass kein Einfluss auf das Zeitfenster genommen werden kann. Die Softstartphase setzt die Tiere erst nach mehreren Zyklen dem vollen Schalldruckpegel aus und ist eine sinnvolle Minimierungsmaßnahme.

Bei den geplanten Funktionstests, die mit einem Schiff vor-Ort durchgeführt werden, sind die Möglichkeiten zur Verminderung von Effekten vielfältiger. Vor der Aktivierung des Transponders können Pinger eingesetzt werden, die die Tiere aus dem direkten Umfeld der Schallquelle vertreiben. Auch eine optische Überwachung des Beobachtungsgebietes und ggf. Verschiebung des Tests, wenn sich marine Säuger in der Umgebung des Transponders befinden könnten die Effekte mindern.

Sehr wichtig ist bei eventuellen Funktionstests das Zeitfenster, in dem die Tests durchgeführt werden. Besonders sensible Phasen, wie die Zeit, in der Jungtiere geboren und aufgezogen werden, sollten gemieden werden, da in diesen Phasen eine erhöhte Empfindlichkeit angenommen wird. Je nach Einsatzgebiet können auch eventuell existierende saisonale Schwankungen in der Abundanz der Tiere genutzt werden, um möglichst wenige Tiere dem Schall auszusetzen.

# 5.5 Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage der Messwerte ist eine Hörschwellenverschiebung bei Schweinswalen und Robben infolge eines kurzfristigen Sonartranspondereinsatzes nicht zu erwarten. Maskierungen von Kommunikationslauten durch das Transpondersignal sind ebenfalls unwahrscheinlich, da die Transpondersignale nicht im Kommunikationsfrequenzbereich der beiden Arten liegen. Eine Maskierung von anderen biologisch wichtigen Umweltinformationen ist nicht wahrscheinlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Die wesentlichen Effekte von Sonartranspondern auf Schweinswale und Robben sind Vergrämung, Verhaltensänderungen und Stress. Für Schweinswale werden unter guten Wetter- und Schallausbreitungsbedingungen eine Vergrämung bis zu 7 km und Verhaltensänderungen bis zu 10 km in Richtung der Hauptabstrahlung des Schallwandlers erwartet. Für Seehunde werden Vergrämung bis zu 2 km, deutliche Verhaltensänderungen bis in eine Entfernung von 4 km und leichte Verhaltensänderungen bis hin zu 6 km in Richtung der Hauptabstrahlung des Schallwandlers erwartet. Wie die akustischen Simulations- und Messergebnisse zeigen, liegt eine deutliche Richtungsabhängigkeit des Schallfeldes vor, so dass die zu erwartenden Einwirkradien in andere Richtungen entsprechend kleiner ausfallen.

Bei eventuellen Funktionstests sollte ein geeignetes Zeitfenster genutzt werden. Als zusätzliche Vorsichtsmaßnahme um sicherzustellen, dass möglichst keine Tiere den höchsten Schalldruckpegeln ausgesetzt sind könnten Pinger und/oder optische Überwachung genutzt werden.

Die hier gegebenen Einschätzungen gelten allerdings nur für den temporären Betrieb von Sonartransponder in marinen Notfällen bzw. deren Funktionstest. Ein dauerhafter Betrieb der Transponder als Orientierungspunkt z.B. für autonome Unterwasserfahrzeuge würde zu einer deutlich höheren Schallbelastung und damit zu deutlich stärkeren biologischen Effekten führen, die eine Neubewertung der Situation erfordern würde.

# 6 Empfehlungen für die Anordnung, die Installation und den Betrieb von Sonartranspondern an Offshore-Windenergieanlagen (FKZ0325104A/B)

## von Moritz Fricke (ISD)

Ausgehend von den in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen sollen im Folgenden Empfehlungen für die Anordnung, die Installation und den Betrieb von Sonartranspondern an Offshore-Windenergieanlagen ausgesprochen werden.

# 6.1 Installation und Wartung

Wie in Kapitel 2.6 erläutert wurde, ist die Verlegung des Kabels zwar auch auf See möglich, jedoch ist diese Vorgehensweise aufgrund der aufwändigen Taucherarbeiten und der Wetterabhängigkeit mit einem erheblich höheren Aufwand verbunden als eine Installation an Land. Empfohlen wird daher, zumindest die Kabelverlegung und die Installation der Halterungen des Schallwandlers an der Gründungkonstruktion an Land durchzuführen. Ferner sollte im Zuge der Installationsarbeiten an Land eine vollständige Überprüfung der elektrischen Verbindung durch vorübergehenden Anschluss von Schallwandler und Steuergerät durchgeführt werden. Die Installation des Schallwandlers sollte zur Vermeidung von Beschädigungen während der Rammarbeiten erst auf See erfolgen.

Über den Einfluss von marinem Bewuchs auf die sende- und empfangsseitigen Eigenschaften des Schallwandlers konnten im Vorhaben keine umfassenden Erkenntnisse gesammelt werden. Daher ist der Schallwandler zunächst alle 6-9 Monate einer Sichtprüfung und gegebenenfalls einer Reinigung zu unterziehen (vgl. Kap. 2.7). Diese Arbeiten können entweder durch Taucher oder ROVs durchgeführt werden. Ferner ist seitens der THALES Instruments GmbH geplant, den Bewuchszustand der Wandler anhand des Langzeit-Trends der aufgenommenen Hintergrundgeräusche zu überwachen. In einem Intervall von 2 Jahren muss unabhängig vom Bewuchszustand eine Erneuerung der Antifouling-Beschichtung durchgeführt werden. Dazu muss der Wandler durch Taucher deinstalliert und geborgen werden.

# 6.2 Anordnung der Transponder

Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen (vgl. Kap. 3) und der Messungen im Testfeld *alpha ventus* (vgl. Kap. 4) zeigen die Einschränkung der Signalreichweiten unter schlechten Wetterbedingungen sowie die Richtungsabhängigkeit des Schallfeldes. Eine horizontale Winkelabdeckung von 180° (3 dB-Grenzwinkel), die für den Windpark für den Windpark *alpha ventus* gefordert wird, wird weder in der Einbausituation am Tripod noch bei freier Abstrahlung erreicht.

Zur Veranschaulichung wird im Folgenden ein fiktiver Windpark mit 66 Windenergieanlagen und einem viereckigem Grundriss betrachtet. Die Windenergieanlagen stehen ähnlich wie in *alpha ventus* in einem Abstand von 900 m. Für die einzelnen Schallwandler werden die aus Simulation und Messung ermittelten Reichweiten und Richtungsabhängigkeiten angenommen. Die Schallwandler haben einen Quellpegel von 200 dB re 1µPa. Es werden die Isolinien für einen Übertragungsverlust von 100dB konzentrisch zum jeweiligen Sonartransponder dargestellt (siehe Abb. 56). An dieser Stelle sei angemerkt, dass für die Ausstattung von Offshore-Windparks mit Sonartranspondern keine allgemein-

gültige Vorschrift erarbeitet werden kann. Vielmehr muss die Anordnung der Sonartransponder im Einzelfall und unter der Maßgabe einer wirtschaftlichen Optimierung gewählt werden.

# 6.2.1 Beispielanordnung A: Gerade Windpark-Kante

Die Anforderungen aus (Nissen 2004) lauten, dass an den äußeren Anlagen eines Windparks Sonartransponder in einem Abstand von 2 NM zu installieren sind. Abb. 56 sind zwei mögliche Anordnungen für eine gerade äußere Kante des betrachteten fiktiven Windparks zu entnehmen. In der links dargestellten Konfiguration sind die Sonartransponder in einem Abstand von ca. 1,5 NM und rechts in einem Abstand von ca. 2 NM angeordnet. Bereits für einen Abstand der Sonartransponder von ca. 2 NM, also an jeder vierten Windenergieanlage, zeigt sich, dass aufgrund der eingeschränkten Richtcharakteristik kleine Bereiche innerhalb der Sicherheitszone (rote Linie) entstehen, in denen eine Detektion des Transpondersignals unter Umständen nicht möglich ist. Abb. 56 zeigt somit den Grenzfall für den Abstand der Transponder untereinander.

Die Positionen der einzelnen Sonartransponder bzw. Schallwandler ist an die Positionen der Windenergieanlagen gebunden. Da die Abstände der Windenergieanlagen untereinander abhängig vom Anlagentyp und den lokalen Windverhältnissen sind, wird als Empfehlung festgehalten, dass für die Anbringung der Sonartransponder an den geraden Kanten eines Windparks ein maximaler Abstand von 2 NM nicht überschritten wird und als nächstkleineres Vielfaches der Anlagenabstände zu wählen ist.



Windpark-Kante; links: Transponderabstand = 1,5NM; rechts: Transponderabstand = 2NM

# 6.2.2 Beispielanordnung B: Spitze Windpark-Ecke

Der hier betrachtete Windparkgrundriss hat an der südwestlichen Ecke einen Außenwinkel von 315°. Zur Kenntlichmachung dieser Ecke sind in Abb. 57 zwei mögliche Anordnungen von Sonartranspondern dargestellt. Im linken Bild ist unmittelbar an der Ecke ein Sonartransponder mit zwei Schallwandlern angebracht. Die Schallwandler sind in einem horizontalen Winkel von 45° gegeneinander verdreht installiert. Den Anschluss zu den geraden Kanten des Windparks bilden zwei Transponder an den jeweils übernächsten Windenergieanlagen, also im Abstand von jeweils etwa 1 NM. Es ist zu er-
kennen, dass eine vollständige Abdeckung des Sicherheitsbereiches erreicht wird. Im rechten Bild ist nur ein Schallwandler an der äußeren Windenergieanlage installiert. Um eine nahezu vollständige Abdeckung des Sicherheitsbereiches zu gewährleisten, müssen die Sonartransponder an den geraden Kanten in diesem Fall an den jeweils nächsten Windenergieanlagen angebracht werden. Die günstigste Anordnung der Sonartransponder ist hier vom Außenwinkel der Ecke sowie von der Anordnung der Transponder an den angrenzenden geraden Kanten abhängig, so dass die genaue Anordnung im Einzelfall zu prüfen ist.



Abb. 57: Beispielhafte Anordnung der Sonartransponder an einer spitzen Windpark-Ecke; links: Anordnung mit zwei Schallwandlern an der Windparks-Ecke; rechts: Anordnung mit einem Schallwandler an der Windpark-Ecke

### 6.2.3 Beispielanordnung C: Stumpfe Windpark-Ecke

Als nächstes Beispiel wird die südöstliche stumpfe Ecke des Windparks betrachtet, die einen Außenwinkel von 225° aufweist. Die im linken Bild der Abb. 58 dargestellte Anordnung besteht aus drei Sonartranspondern mit je einem Schallwandler, von denen einer direkt an der Ecke installiert und in ost-südöstliche Richtung ausgerichtet ist. Zwei weitere Transponder an den beiden angrenzenden geraden Kanten im Abstand von 1 bzw. 1,5 NM angebracht. Die zweite Anordnung (rechtes Bild) besteht aus nur zwei Transpondern an den benachbarten Windenergieanlagen. Es zeigt sich, dass bei dieser Anordnung ein kleiner Bereich innerhalb der Sicherheitszone nicht abgedeckt wird. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass die Größe dieses Bereiches vom Außenwinkel der Ecke und vom Abstand der Windenergieanlagen untereinander abhängig ist. Auch hier ist die Wahl der Anordnung im Einzelfall zu treffen.

#### Empfehlungen für die Anordnung, die Installation und den Betrieb von Sonartranspondern an Offshore-Windenergieanlagen (FKZ0325104A/B)



Abb. 58: Beispielhafte Anordnung der Sonartransponder an einer stumpfen Windpark-Ecke; links: Anordnung mit einem Sonartransponder an der Windparks-Ecke; rechts: Beinahe vollständige Abdeckung der Sicherheitszone durch benachbarte Sonartransponder

#### 6.2.4 Beispielanordnung D: Rechtwinklige Windpark-Ecke

Als letzte Beispielanordnung soll die nordöstliche rechtwinklige Ecke des Windparks Betrachtung finden. In Abb. 59 ist an der Ecke ein Sonartransponder mit zwei Schallwandlern installiert. Den Anschluss an die angrenzenden Kanten bilden zwei Sonartransponder im Abstand von je ca. 1,5 NM. Im rechten Bild ist der Sonartransponder an der nordöstlichen Ecke mit nur einem Transponder ausgestattet. Mit beiden Anordnungen lässt sich eine vollständige Abdeckung der Sicherheitszone erzielen, so dass die rechte Variante unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten der linken vorzuziehen ist.



Abb. 59: Beispielhafte Anordnung der Sonartransponder an einer rechtwinkligen Windpark-Ecke; links: Anordnung mit zwei Schallwandlern an der Windparks-Ecke; rechts: Anordnung mit einem Schallwandler an der Windparkecke

### 6.3 Sicherheitsrelevante und ökologische Aspekte

Der bestimmungsgemäße Betrieb von Sonartranspondern an Offshore-Windparks sieht vor, dass diese nur im Notfall durch ein Unterwasserfahrzeug aktiviert werden. Es ist daher von einem sehr seltenen Ereignis auszugehen, dessen langfristige biologische Effekte als gering einzuschätzen sind. Anders als die Auslösung der Sonartransponder im Notfall kann die Durchführung von eventuellen Funktionstests genau terminiert werden. Diese sollten nach Möglichkeit nicht in Phasen fallen, in denen mit einer erhöhten Jungtierpopulation zu rechnen ist. Darüber hinaus sollten Funktionstest nach Möglichkeit mit reduzierter Sendeleistung durchgeführt werden. Besteht diese Möglichkeit nicht, so sind vor Erreichen der vollen Sendeleistung zwei bis drei Sendesequenzen mit kontinuierlich steigender Sendeleistung auszulösen. Dies entspricht einer Zeit von 10-15 Minuten zur Vergrämung in der Nähe befindlicher mariner Säugetiere.

Die Installation und Wartung von Offshore-Windenergieanlagen bringt häufig den Einsatz von Tauchern mit sich. Taucharbeiten erfordern gute Wetterbedingungen, unter denen mit einer geringen Dämpfung des Transpondersignals zu rechnen ist. Zur Gewährleistung der Sicherheit von Tauchern müssen daher vor Beginn der Taucharbeiten alle Sonartransponder im Umkreis von 4 NM deaktiviert werden. Die Deaktivierung wird durch den Betreiber des jeweiligen Windparks durchgeführt. Bei einer Deaktivierung durch den Betreiber darf nur in enger Absprache mit dem Flottenkommando geschehen.

# 7 Literaturverzeichnis

- Ainslie, M. A. (2005). Effect of wind-generated bubbles on fixed range acoustic attenuation in shallow water at 1–4 kHz. The Journal of the Acoustical Society of America, 118, 3513.
- Akamatsu, T., Wang, D., Wang, K., und Naito, Y. (2005). Biosonar behaviour of free-ranging porpoises. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 272(1565), 797.
- Andersen, S. (1970). Auditory sensitivity of the harbour porpoise Phocoena phocoena. Investigations on Cetacea, 2, 255–259.
- Au, W. W. ., Kastelein, R. A., Rippe, T., und Schooneman, N. M. (1999). Transmission beam pattern and echolocation signals of a harbor porpoise (Phocoena phocoena). The Journal of the Acoustical Society of America, 106, 3699.
- Au, W. W. L. (1993). The sonar of dolphins. Springer-Verlag; ISBN: 0-387-97835-6.
- Bain, D. E., und Williams, R. (2006). Long-range effects of airgun noise on marine mammals: responses as a function of received sound level and distance. Int. Whal. Comm. Working Pap. SC/58/ E, 35.
- Bejder, L., Samuels, A., Whitehead, H., Finn, H., und Allen, S. (2009). Impact assessment research: use and misuse of habituation, sensitisation and tolerance in describing wildlife responses to anthropogenic stimuli. Marine Ecology Progress Series 395; 177-185.
- Betke, K., und Schultz-von Glahn, M. (2008). Prognose des Unterwassergeräusches beim Bau und beim Betrieb des Offshore-Windparks Borkum-West ("alpha ventus") und Messung des Hintergrundgeräusches im Planungsgebiet. Bericht vom 15.10.2008. Online verfügbar auf www.bsh.de.
- Bordino, P., Kraus, S., Albareda, D., Fazio, A., Palmerio, A., Mendez, M., und Botta, S. (2002). Reducing incidental mortality of Franciscana dolphin Pontoporia blainvillei with acoustic warning devices attached to fishing nets. Marine Mammal Science, 18(4), 833–842.
- Brandt, M. J., Diederichs, A., Betke, K., Matuschek, R., Witte, S., und Nehls, G. (2011b). Effectiveness of a sealscarer in deterring harbour porpoises (Phocoena phocoena) and its application as a mitigation measure during offshore pile driving. Final report funded by Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ: 0325141) and DONG energy Part of and financed: Environmental Monitoring Programme Danish Offshore Demonstration Programme for large scale wind farms.
- Brandt, M. J., Diederichs, A., Betke, K., und Nehls, G. (2011a). Responses of harbour porpoises to pile driving at the Horns Rev II offshore wind farm in the Danish North Sea. Mar Ecol Prog Ser, 421, 205–216.
- Brekhovskikh, L. M., und Lysanov, I. U. . (1982). Fundamentals of ocean acoustics. Springer-Verlag; ISBN: 0-387-95467-8.
- Børgesæter, A., Ugland, K. I., und Børge, A. (2004). Geographic variation and acoustic structure of the underwater vocalization of harbor seal (Phoca vitulina) in Norway, Sweden and Scotland. The Journal of the Acoustical Society of America, 116, 2459.
- Clark, C. W., Ellison, W. T., Southall, B. L., Hatch, L., Van Parijs, S. M., Frankel, A., und Ponirakis, D. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. Marine Ecology Progress Series, 395, 201–222.
- Clark, W. W. (1991). Recent studies of temporary threshold shift (TTS) and permanent threshold shift (PTS) in animals. Journal of the Acoustical Society of America, 90, 155-163.
- Clausen, K. T., Wahlberg, M., Beedholm, K., Deruiter, S., und Madsen, P. T. (2010). Click communi-

cation in harbour porpoises Phocoena phocoena. Bioacoustics The International Journal Of Animal Sound And Its Recording, 20(1), 1–28.

- Clay, C. (1964). Effect of a slightly irregular boundary on the coherence of waveguide propagation. The Journal of the Acoustical Society of America, 36, 833.
- Cox, T. M., Read, A. J., Solow, A., und Tregenza, N. (2001). Will harbour porpoises (Phocoena phocoena) habituate to pingers? Journal of Cetacean Research and Management, 3(1), 81–86.
- Culik, B. M., Koschinski, S., Tregenza, N., und Ellis, G. M. (2001). Reactions of harbor porpoises Phocoena and herring Clupea harengus to acoustic alarms. Marine Ecology Progress Series, 211, 255–260.
- Cummings, W. C., Holzmann, J. M., und Thompson, P. O. (1975). Underwater sound pressure minima in bioacoustic test tanks NUC TP 450. U.S. Naval Undersea Center.
- Deecke, V. B., Slater, P. J. ., und Ford, J. K. . (2002). Selective habituation shapes acoustic predator recognition in harbour seals. Nature, 420(6912), 171–173.
- Erbe, C. (2002). Hearing abilities of baleen whales. Report CR, 65.
- Erbe, C., und Farmer, D. M. (2000). Zones of impact around icebreakers affecting beluga whales in the Beaufort Sea. The Journal of the Acoustical Society of America, 108, 1332.
- Fertl, D. (2009). Fisheries, Interference with. In: W.F. P, Thewissen JGM, B. W (eds) Encyclopedia of Marine Mammals. Academic Press, p 439-443.
- Fjälling, A., Wahlberg, M., und Westerberg, H. (2006). Acoustic harassment devices reduce seal interaction in the Baltic salmon-trap, net fishery. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 63(9), 1751.
- Franse, R. (2005). Effectiveness of acoustic deterrent devices (pingers). Universiteit Leiden Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden Juli.
- Gill, J. A., Norris, K., und Sutherland, W. J. (2001). Why behavioural responses may not reflect the population consequences of human disturbance. Biological Conservation, 97(2), 265–268.
- Graham, I. M., Harris, R. N., Denny, B., Fowden, D., und Pullan, D. (2009). Testing the effectiveness of an acoustic deterrent device for excluding seals from Atlantic salmon rivers in Scotland. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 66(5), 860.
- Gönener, S., und Bilgin, S. (2009). The Effect of Pingers on Harbour Porpoise, Phocoena phocoena Bycatch and Fishing Effort in the Turbot Gill Net Fishery in the Turkish Black Sea Coast. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 9, 151–157.
- Hanggi, E. B., und Schusterman, R. J. (1994). Underwater acoustic displays and individual variation in male harbour seals, (Phoca vitulina). Animal Behaviour, 48, 1275-1283.
- Hanke, W., Witte, M., Miersch, L., Brede, M., Oeffner, J., Michael, M., Hanke, F., Leder, A., und Dehnhardt, G. (2010). Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations. Journal of Experimental Biology, 213(15), 2665.
- Hansen, M., Wahlberg, M., und Madsen, P. T. (2008). Low-frequency components in harbor porpoise (Phocoena phocoena) clicks: communication signal, by-products, or artifacts? The Journal of the Acoustical Society of America, 124, 4059.
- Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. Marine Ecology Progress Series, 395, 5–20.
- Holt, M. M., Noren, D. P., Veirs, V., Emmons, C. K., und Veirs, S. (2009). Speaking up: Killer whales (Orcinus orca) increase their call amplitude in response to vessel noise. The Journal of the Acoustical Society of America, 125, EL27-EL32.
- Holt, M. M., und Schusterman, R. J. (2007). Spatial release from masking of aerial tones in pinnipeds.

The Journal of the Acoustical Society of America, 121, 1219.

- Jacobs, S. R., und Terhune, J. M. (2002). The effectiveness of acoustic harassment devices in the Bay of Fundy, Canada: seal reactions and a noise exposure model. Aquatic Mammals, 28(2), 147–158.
- Jasny, M., Reynolds, J., Horowitz, C., und Wetzler, A. (2005). Sounding the depths II: The rising toll of sonar, shipping and industrial ocean noise on marine life. Natural Resources Defence Council.
- Jefferson, T. A., und Curry, B. E. (1996). Acoustic methods of reducing or eliminating marine mammal-fishery interactions: do they work? Ocean & coastal management, 31(1), 41–70.
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., und Schmidt, H. (2011). Computational ocean acoustics. Springer-Verlag.
- Jensen, F. H., Bejder, L., Wahlberg, M., Soto, A., und Madsen, P. T. (2009). Vessel noise effects on delphinid communication. Marine Ecology Progress Series, 395, 161–175.
- Jepson, P. D., Arbelo, M., Deaville, R., Patterson, I. A. P., Castro, P., Baker, J. R., Degollada, E., Ross, H. M., Herráez, P., Pocknell, A. M., und others. (2003). Gas-bubble lesions in stranded cetaceans. Nature, 425(6958), 575–576.
- Jepson, P. D., Deaville, R., Patterson, I. A. P., Pocknell, A. M., Ross, H. M., Baker, J. R., Howie, F. E., Reid, R. J., Colloff, A., und Cunningham, A. A. (2005). Acute and chronic gas bubble lesions in cetaceans stranded in the United Kingdom. Veterinary Pathology Online, 42(3), 291.
- Johnston, D. W. (2002). The effect of acoustic harassment devices on harbour porpoises (Phocoena phocoena) in the Bay of Fundy, Canada. Biological Conservation, 108(1), 113–118.
- Kastak, D., Mulsow, J., Ghoul, A., und Reichmuth, C. (2008). Noise-induced permanent threshold shift in a harbor seal. Acoustical Society of America Journal, 123, 2986.
- Kastak, D., und Schusterman, R. J. (1998). Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: methods, measurements, noise, and ecology. The Journal of the Acoustical Society of America, 103, 2216.
- Kastelein, R. A., Au, W. W. L., Rippe, H. T., und Schooneman, N. M. (1999). Target detection by an echolocating harbor porpoise (Phocoena phocoena). The Journal of the Acoustical Society of America, 105, 2493.
- Kastelein, R. A., Au, W. W. L., und De Haan, D. (2000). Detection distances of bottom-set gillnets by harbour porpoises (Phocoena phocoena) and bottlenose dolphins (Tursiops truncatus). Marine environmental research, 49(4), 359–375.
- Kastelein, R. A., Bunskoek, P., Hagedoorn, M., Au, W. W. ., und de Haan, D. (2002). Audiogram of a harbor porpoise (Phocoena phocoena) measured with narrow-band frequency-modulated signals. The Journal of the Acoustical Society of America, 112, 334.
- Kastelein, R. A., van der Heul, S., Terhune, J. M., Verboom, W. C., und Triesscheijn, R. J. (2006a). Deterring effects of 8-45 kHz tone pulses on harbour seals (Phoca vitulina) in a large pool. Marine environmental research, 62(5), 356–373.
- Kastelein, R. A., van der Heul, S., Verboom, W. C., Triesscheijn, R. J. ., und Jennings, N. V. (2006b). The influence of underwater data transmission sounds on the displacement behaviour of captive harbour seals (Phoca vitulina). Marine environmental research, 61(1), 19–39.
- Kastelein, R. A., Hoek, L., Jennings, N., de Jong, C. A. F., Terhune, J. M., und Dieleman, M. (2010).Acoustic mitigation devices (AMDs) to deter marine mammals from pile-driving areas at sea:Audibility and behavioural response of a harbour porpoise and harbour seals. COWRIE, 68 p.
- Kastelein, R. A., Wensveen, P. J., Hoek, L., Verboom, W. C., und Terhune, J. M. (2009). Underwater detection of tonal signals between 0.125 and 100 kHz by harbor seals (Phoca vitulina). The

Journal of the Acoustical Society of America, 125, 1222.

- Kastelein, R., Wensveen, P., Hoek, L., Verboom, W., Terhune, J., Lambers, R. H. R., und IJmuiden, W. I. L. (2008). Underwater hearing sensitivity of harbour seals for tonal signals and noise bands. IMARES report C040.08.
- Khan, C. B., Markowitz, H., und McCowan, B. (2006). Vocal development in captive harbor seal pups, Phoca vitulina richardii: Age, sex, and individual differences. The Journal of the Acoustical Society of America, 120, 1684.
- Kipple, B., und Gabriele, C. (2003). Glacier Bay Watercraft Noise. Naval Surface Warfare Center. Technical Report NSWCCD-71-TR-2003/522.
- Koschinski, S., Culik, B. M., Henriksen, O. D., Tregenza, N., Ellis, G., Jansen, C., und Kathe, G. (2003). Behavioural reactions of free-ranging porpoises and seals to the noise of a simulated 2 MW windpower generator. Marine Ecology Progress Series, 265, 263–273.
- Kraan, S., und van Etten, Y. (1995). Die Unterseite des Wattenmeeres. Wattenvereinigung Harlingen.
- Larsen, F., Vinther, M., und Krog, C. (2002). Use of pingers in the Danish North Sea wreck net fishery. Rep Int Whal Comm SC/54/SM32, 1–8.
- Lepper, P. A., Turner, V. L. G., Goodson, A. D., und Black, K. D. (2004). Source levels and spectra emitted by three commercial aquaculture anti-predation devices. Proceedings of the Seventh European Conference on Underwater Acoustics, ECUA 2004, Delft, The Netherlands.
- Lerch, R., Sessler, G., und Wolf, D. (2008). Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen. Springer-Verlag; ISBN: 978-3-540-23430-2.
- Lucke, K., Hanke, W., und Denhardt, G. (2004). Untersuchungen zum Einfluß akustischer Emissionen von Offshore-Windkraftanlagen auf marine Säuger im Bereich der deutschen Nord- und Ostsee. In: Marine Warmblüter in Nord- und Ostsee: Grundlagen zur Bewertung von Windkraftanlagen im Offshore-Bereich Endbericht (FKZ: 0327520). Nationalpark schleswig-holsteinisches Wattenmeer und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Lucke, K., Lepper, P. A., Hoeve, B., Everaarts, E., Van Elk, N., und Siebert, U. (2007). Perception of low-frequency acoustic signals by a harbour porpoise (Phocoena phocoena) in the presence of simulated offshore wind turbine noise. Aquatic Mammals, 33(1), 55–68.
- Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P. A., und Blanchet, M. A. (2009). Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbor porpoise (Phocoena phocoena) after exposure to seismic airgun stimuli. The Journal of the Acoustical Society of America, 125, 4060.
- Lucke, K., Siebert, U., Sundermeyer, J., und Benke, H. (2006). Weiterführende Untersuchungen zum Einfluß akustischer Emissionen von Offshore Windenergieanlagen auf marine Säuger in Nordund Ostsee. In: Minos/Plus – Weiterführende Arbeiten an Seevögeln und marinen Säugern zur Bewertung von Offshore-Windkraftanlagen - Zweiter Zwischenbericht. Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer.
- Lurton, X. (2002). An introduction to underwater acoustics: principles and applications. Springer-Verlag; ISBN 3-540-42967-0.
- Lusseau, D., Bain, D. E., Williams, R., und Smith, J. C. (2009). Vessel traffic disrupts the foraging behavior of southern resident killer whales Orcinus orca. Endangered Species Research, 6(3), 211–221.
- Lusseau, D., und Bejder, L. (2007). The long-term consequences of short-term responses to disturbance experiences from whalewatching impact assessment. International Journal of Comparative Psychology, 20(2).
- MMC. (2007). Marine mammals and noise A sound approach to research and management, A Report to Congress from the Marine Mammal Commission. Marine Mammal Commission.

- MacLennan, D. N., und Simmonds, E. J. (1992). Fisheries acoustics. Chapman & Hall Fish and Fisheries Series 5; ISBN: 0-412-33060-1.
- Madsen, P. T., Carder, D. A., Bedholm, K., und Ridgway, S. H. (2005). Porpoise Clicks from a Sperm Whale Nose-Convergent Evolution of 130 kHz Pulses in Toothed Whale Sonars? Bioacoustics, 15(2), 195.
- McEwen, B. S., und Stellar, E. (1993). Stress and the individual: mechanisms leading to disease. Archives of internal medicine, 153(18), 2093–2101.
- Mohl, B. (1968). Auditory sensitivity of the common seal in air and water. Journal of Auditory Research.
- Morton, A. B., und Symonds, H. K. (2002). Displacement of Orcinus orca (L.) by high amplitude sound in British Columbia, Canada. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 59(1), 71.
- Møhl, B., und Andersen, S. (1973). Echolocation: high-frequency component in the click of the harbour porpoise (Phocoena ph. L.). The Journal of the Acoustical Society of America, 54(5), 1368-1379.
- National Research Council. (2005). Marine mammal populations and ocean noise: determining when noise causes biologically significant effects. Committee on Characterizing Biologically Significant Marine Mammal Behavior. The National Academies Press.
- Nedwell, J. R., Brooker, A. G., Bryant, S. A. H., und Barham, R. J. (2010). Measurements of Underwater Noise Generated by Acoustic Mitigation Devices. COWRIE Report No E238R0122; ISBN: 978-0-9565843-2-8.
- Nedwell, J. R., Edwards, B., Turnpenny, A. W. H., und Gordon, J. (2004). Fish and Marine Mammal Audiograms: A summary of available information. Subacoustech Report ref: 534R0214.
- Nissen, I. (2004). Akustische Kenntlichmachung von künstlichen Unterwassergefahrenquellen Modellierung und Leistungsdaten. KB 2004-1 der Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik (FWG).
- Novarini, J. C., und Bruno, D. R. (1982). Effects of the sub-surface bubble layer on sound propagation. The Journal of the Acoustical Society of America, 72, 510.
- Nowacek, D. P., Johnson, M. P., und Tyack, P. L. (2004). North Atlantic right whales (Eubalaena glacialis) ignore ships but respond to alerting stimuli. Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 271(1536), 227.
- Nystuen, J. A., McGlothin, C. C., und Cook, M. S. (1993). The underwater sound generated by heavy rainfall. J. Acoust. Soc. Am. 93(8), 3169-3177.
- Nystuen, J. A., McPhaden, M. J., und Freitag, H. P. (2000). Surface Measurements of Precipitation from an Ocean Mooring: The Underwater Acoustic Log from the South China Sea. J. Appl. Met 39(12), 2182-2197.
- Olesiuk, P. F., Nichol, L. M., Sowden, M. J., und Ford, J. K. (2002). Effect of the sound generated by an acoustic harassment device on the relative abundance and distribution of harbor porpoises (Phocoena phocoena) in retreat passage, British Columbia. Marine mammal science, 18(4), 843–862.
- Van Parijs, S. M., und Kovacs, K. M. (2002). In-air and underwater vocalizations of eastern Canadian harbour seals, Phoca vitulina. Canadian journal of zoology, 80(7), 1173–1179.
- Piantadosi, C. A., und Thalmann, E. D. (2004). Whales, sonar and decompression sickness. Nature, 15, 1–2.
- Popov, V. V., Supin, A. Y., Wang, D., und Wang, K. (2006). Nonconstant quality of auditory filters in the porpoises, Phocoena phocoena and Neophocaena phocaenoides (Cetacea, Phocoenidae). The

Journal of the Acoustical Society of America, 119, 3173.

- Quick, N. J., Middlemas, S. J., und Armstrong, J. D. (2004). A survey of antipredator controls at marine salmon farms in Scotland. Aquaculture, 230(1-4), 169–180.
- Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., und Thomson, D. H. (1998). Marine mammals and noise. Academic Press; ISBN: 0-12-588441-9.
- Schuchardt, B., Bachmann, F., Bildstein, T., Dau, K., und Günther, C. P. (2008). Basisaufnahme Offshore Windpark alpha ventus. Fachgutachten Makrozoobenthos und Fische. BIOCONSULT Schuchardt & Scholle GbR,. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- Schusterman, R. J., Balliet, R. F., und St John, S. (1970). Vocal displays under water by the gray seal, the harbor seal, and the Steller sea lion. Psychon. Sci, 18, 303–305.
- Schusterman, R. J., Kastak, D., Levenson, D. H., Reichmuth, C. J., und Southall, B. L. (2000). Why pinnipeds don't echolocate. The Journal of the Acoustical Society of America, 107, 2256.
- Schusterman, R. J., und Van Parijs, S. M. (2003). Pinniped vocal communication: an introduction. Aquatic Mammals, 29(2), 177–180.
- Shapiro, A. D., Tougaard, J., JU00F8rgensen, P. B., Kyhn, L. A., Balle, J. D., Bernardez, C., Fj\älling, A., Karlsen, J., und Wahlberg, M. (2009). Transmission loss patterns from acoustic harassment and deterrent devices do not always follow geometrical spreading predictions. Marine mammal science, 25(1), 53–67.
- Sherman, C. H., Butler, J. L., und Brown, D. A. (2008). Transducers and arrays for underwater sound. The Journal of the Acoustical Society of America, 124, 1385.
- Southall, B. L. (2005). Shipping noise and marine mammals: A forum for science, management, and technology. Final report of the National and Atmospheric Administration (NOAA) International Symposium.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene Jr, C. R., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., und others. (2009). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. The Journal of the Acoustical Society of America, 125, 2517.
- Southall, B. L., Schusterman, R. J., und Kastak, D. (2000). Masking in three pinnipeds: Underwater, low-frequency critical ratios. The Journal of the Acoustical Society of America, 108, 1322.
- Sveegard, S., Tougaard, J., und Teilmann, J. (2008). Sprogø Wind Farm. Environmental Impact Assessment Background Report on Marine Mammals. Commissioned Report to Sund&Bælt.
- Tavolga, W. N. (1974). Signal/noise ratio and the critical band in fishes. The Journal of the Acoustical Society of America, 55, 1323.
- Teilmann, J., Miller, L. A., Kirketerp, T., Kastelein, R. A., Madsen, P. T., Nielsen, B. K., und Au, W. W. . (2002). Characteristics of echolocation signals used by a harbour porpoise (Phocoena phocoena) in a target detection experiment. Aquatic Mammals, 28(3), 275–284.
- Thales Instruments. (2010). Produktspezifikation Sonartransponder WISO TH-ST01. Thales Instruments GmbH.
- Thiele, R., und Schellstede, G. (1980). Standardwerte zur Ausbreitungsdämpfung in der Nordsee. FWG-Bericht 1980-7. Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik, Kiel.
- Tooms, S., Taherzadeh, S., und Attenborough, K. (1993). Sound propagation in a refracting fluid above a layered fluid-saturated porous elastic material. The Journal of the Acoustical Society of America, 93, 173.
- Tougaard, J., Henriksen, O. D., und Miller, L. A. (2009). Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. The

Journal of the Acoustical Society of America, 125, 3766.

- Trippel, E. A., Strong, M. B., Terhune, J. M., und Conway, J. D. (1999). Mitigation of harbour porpoise (Phocoena phocoena) by-catch in the gillnet fishery in the lower Bay of Fundy. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 56, 113–123.
- Urban, H. G. (2002). Handburch der Wasserschalltechnik. Eigenverlag der STN ATLAS Elektronik GmbH; ISBN: 3-936799-02-4.
- Urick, R. J. (1983). Principles of underwater sound. Peninsuka Publishing; ISBN: 0-932146-62-7.
- Villadsgaard, A., Wahlberg, M., und Tougaard, J. (2007). Echolocation signals of wild harbour porpoises, Phocoena phocoena. Journal of Experimental Biology, 210(1), 56.
- Vorländer, M. (2008). Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. Springer-Verlag; ISBN: 978-3-540-48829-3.
- WTD71, F. (2010). Vermessungsbericht Sonartranspondersystem THALES WISO ST01. unveröffentlicht.
- Waite, A. D. (2001). Sonar for practising engineers. Wiley; ISBN: 0471497509.
- Werner, S. (2011). Empfehlung von Lärmschutzwerten bei der Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Information Unterwasserlärm des Umweltbundesamtes.
- Wille, P. C., und Geyer, D. (1984). Measurements on the origin of the wind-dependent ambient noise variability in shallow water. J. Acoust. Soc. Am. 75(1), 175-185.
- Wright, A. J., Soto, N. A., Baldwin, A. L., Bateson, M., Beale, C. M., Clark, C., Deak, T., Edwards, E. F., Fernández, A., Godinho, A., und others. (2007). Do Marine Mammals Experience Stress Related to Anthropogenic Noise? International Journal of Comparative Psychology, 20(2).
- Yurk, H. T., und Trites, A. W. (2000). Experimental attempts to reduce predation by harbor seals on out-migrating juvenile salmonids. Transactions of the American Fisheries Society.

# A Anhang

## A.1 Wetterverhältnisse während der Messkampagnen



Abb. 60: Aufnahmen der Wasseroberfläche zur Veranschaulichung des Seegangszustandes während der beiden Messkampagnen; links: 1. Messkampagne, aufgenommen am 13.10.2010; rechts: 2. Messkampagne, aufgenommen am 24.02.2011

## A.2 Messpositionen und Positionierungsgenauigkeit

Tab. 17: Zielpositionen und tatsächliche mittlere Messposition während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV12 während der Messkampagne 10/2010; Aus Sicherheitsgründen nicht angefahrerene Positionen sind durch "---" gekennzeichnet.

| PosNr. | Entfernung<br>(SOLL) in m | Winkel (SOLL)<br>in ° | mittl. Entfer-<br>nung (IST) in m | mittl. Winkel<br>(IST) in ° |
|--------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| A01    | 450                       | 180                   | 273                               | 176                         |
| A02    | 450                       | 135                   | 530                               | 120                         |
| A03    | 450                       | 90                    | 509                               | 71                          |
| A04    | 450                       | 45                    | 512                               | 44                          |
| A05    | 450                       | 0                     | 893                               | 19                          |
| A06    |                           |                       |                                   |                             |
| A07    | 900                       | 135                   | 843                               | 125                         |
| A08    | 900                       | 90                    | 1047                              | 83                          |
| A09    | 900                       | 45                    | 1118                              | 36                          |
| A10    | 900                       | 0                     | 900                               | 0                           |
| A11    |                           |                       |                                   |                             |
| A12    | 1800                      | 135                   | 1931                              | 122                         |
| A13    | 1800                      | 90                    | 1900                              | 83                          |
| A14    | 1800                      | 45                    | 1929                              | 43                          |
| A15    | 1800                      | 0                     | 2038                              | 0                           |
| A16    | 3600                      | 180                   | 3237                              | 179                         |
| A17    | 3600                      | 135                   | 3681                              | 135                         |
| A18    | 3600                      | 90                    | 3513                              | 86                          |
| A19    | 3600                      | 45                    | 3729                              | 44                          |
| A20    | 3600                      | 0                     | 3793                              | 1                           |
| A21    | 7200                      | 180                   | 6662                              | 180                         |
| A22    | 7200                      | 135                   | 7129                              | 133                         |
| A23    | 7200                      | 90                    | 7259                              | 89                          |
| A24    | 7200                      | 45                    | 7412                              | 43                          |
| A25    | 7200                      | 0                     | 7408                              | 0                           |

| PosNr. | Entfernung<br>(SOLL) in m | Winkel (SOLL)<br>in ° | mittl.Entfernung<br>(IST) in m | mittl. Winkel<br>(IST) in ° |
|--------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| A01    |                           |                       |                                |                             |
| A02    |                           |                       |                                |                             |
| A03    |                           |                       |                                |                             |
| A04    |                           |                       |                                |                             |
| A05    | 450                       | 0                     | 523                            | 6                           |
| A06    |                           |                       |                                |                             |
| A07    | 900                       | 135                   | 956                            | 135                         |
| A08    | 900                       | 90                    | 949                            | 92                          |
| A09    | 900                       | 45                    | 981                            | 55                          |
| A10    | 900                       | 0                     | 922                            | 3                           |
| A11    |                           |                       |                                |                             |
| A12    | 1800                      | 135                   | 1900                           | 136                         |
| A13    | 1800                      | 90                    | 1869                           | 92                          |
| A14    | 1800                      | 45                    | 1874                           | 47                          |
| A15    | 1800                      | 0                     | 1845                           | 5                           |
| A16    | 3600                      | 180                   | 3705                           | 178                         |
| A17    | 3600                      | 135                   | 3835                           | 134                         |
| A18    | 3600                      | 90                    | 3826                           | 93                          |
| A19    | 3600                      | 45                    | 3806                           | 43                          |
| A20    | 3600                      | 0                     | 3796                           | 2                           |
| A21    | 7200                      | 180                   | 7175                           | 180                         |
| A22    | 7200                      | 135                   | 7158                           | 134                         |
| A23    | 7200                      | 90                    | 7197                           | 89                          |
| A24    | 7200                      | 45                    | 7204                           | 44                          |
| A25    | 7200                      | 0                     | 7190                           | 0                           |

Tab. 18: Zielpositionen und tatsächliche mittlere Messposition während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV12 während der Messkampagne 02/2011; Aus Sicherheitsgründen nicht angefahrerene Positionen sind durch "---" gekennzeichnet.

Tab. 19: Zielpositionen und tatsächliche mittlere Messposition während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV10 während der Messkampagne 02/2011; "--": Aus Sicherheitsgründen ausgelassene Pos.; "xx" Aufgrund zu geringer Pegel ausgelassene Pos.

| PosNr. | Entfernung<br>(SOLL) in m | Winkel (SOLL)<br>in ° | mittl.Entfernung<br>(IST) in m | mittl. Winkel<br>(IST) in ° |
|--------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| B01    |                           |                       |                                |                             |
| B02    |                           |                       |                                |                             |
| B03    |                           |                       |                                |                             |
| B04    |                           |                       |                                |                             |
| B05    |                           |                       |                                |                             |
| B06    | 900                       | 180                   | 771                            | 179                         |
| B07    | 900                       | 135                   | 867                            | 141                         |
| B08    | 900                       | 90                    | 950                            | 84                          |
| B09    | 900                       | 45                    | 829                            | 51                          |
| B10    | 900                       | 0                     | 918                            | 4                           |
| B11    | 1800                      | 180                   | 1863                           | 176                         |
| B12    | 1800                      | 135                   | 1734                           | 133                         |
| B13    | 1800                      | 90                    | 1603                           | 85                          |
| B14    | 1800                      | 45                    | 1887                           | 39                          |
| B15    | 1800                      | 0                     | 1623                           | 3                           |
| B16    | 3600                      | 180                   | 3549                           | 177                         |
| B17    | 3600                      | 135                   | 3395                           | 134                         |
| B18    | 3600                      | 90                    | 3372                           | 88                          |
| B19    | 3600                      | 45                    | 3455                           | 39                          |
| B20    | 3600                      | 0                     | 3750                           | 5                           |
| B21    | XX                        | XX                    | XXX                            | XX                          |
| B22    | XX                        | XX                    | XX                             | XX                          |
| B23    | XX                        | XX                    | XX                             | XX                          |
| B24    | XX                        | XX                    | XX                             | XX                          |
| B25    | XX                        | XX                    | XX                             | XX                          |



Abb. 61: Kartendarstellung der Zielpositionen und der tatsächlichen mittleren Messposition während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV12 während der Messkampagne 10/2010



Abb. 62: Kartendarstellung der Zielpositionen und der tatsächlichen mittleren Messposition während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV12 während der Messkampagne 02/2011



Abb. 63: Kartendarstellung der Zielpositionen und der tatsächlichen mittleren Messposition während der Vermessung der Übertragungsverluste an AV10 während der Messkampagne 02/2011



A.3 Spektrogramme der gemessenen Sendesequenzen

Abb. 64: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A01; Messkampagne 10/2010







Abb. 66: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A03; Messkampagne 10/2010



Abb. 67: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A04; Messkampagne 10/2010



Abb. 68: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A05; Messkampagne 10/2010







Abb. 70: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A08; Messkampagne 10/2010



Abb. 71: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A09; Messkampagne 10/2010

60

300

=1Hz)

250



Abb. 72: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A10; Messkampagne 10/2010





Abb. 74: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A13; Messkampagne 10/2010

Abb. 75: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A14; Messkampagne 10/2010



Abb. 76: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A15; Messkampagne 10/2010





Abb. 78: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A17; Messkampagne 10/2010

Abb. 79: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A18; Messkampagne 10/2010



Abb. 80: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A19; Messkampagne 12/2010





Abb. 82: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A21; Messkampagne 10/2010

Abb. 83: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A22; Messkampagne 10/2010



Abb. 84: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A23; Messkampagne 10/2010



Abb. 86: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A25; Messkampagne 10/2010

Abb. 85: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A24; Messkampagne 10/2010



Abb. 87: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A05; Messkampagne 02/2011



Abb. 89: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A08; Messkampagne 02/2011

Abb. 88: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A07; Messkampagne 02/2011



Abb. 90: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A09; Messkampagne 02/2011



Abb. 91: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A10; Messkampagne 02/2011





Abb. 93: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A12; Messkampagne 02/2011

Abb. 94: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A13; Messkampagne 02/2011



Abb. 95: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A15; Messkampagne 02/2011





Abb. 97: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A17; Messkampagne 02/2011

Abb. 98: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A18; Messkampagne 02/2011



Abb. 99: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A19; Messkampagne 02/2011





Abb. 101: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A21; Messkampagne 02/2011

Abb. 102: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A22; Messkampagne 02/2011



Abb. 103: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A23; Messkampagne 02/2011





Abb. 105: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt A25; Messkampagne 02/2011



Abb. 106: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B06; Messkampagne 02/2011



Abb. 108: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B08; Messkampagne 02/2011

Abb. 107: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B07; Messkampagne 02/2011



Abb. 109: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B09; Messkampagne 02/2011



Abb. 110: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B10; Messkampagne 02/2011



Abb. 112: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B12; Messkampagne 02/2011

Abb. 111: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B11; Messkampagne 02/2011



Abb. 113: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B13; Messkampagne 02/2011



Abb. 114: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B1; Messkampagne 02/2011





Abb. 116: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B16; Messkampagne 02/2011

Abb. 117: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B17; Messkampagne 02/2011



Abb. 118: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B18; Messkampagne 02/2011





Abb. 120: Spektrogramm und abgeleitete Pegelgrößen; Messpunkt B20; Messkampagne 02/2011